ISSN: 2306-9716 (Print)
ISSN: 2664-6110 (Online)

МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІКИ ТА ДОВКІЛЛЯ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНА НАУКОВА УСТАНОВА «ІНСТИТУТ ЕКОЛОГІЧНОГО ВІДНОВЛЕННЯ ТА РОЗВИТКУ УКРАЇНИ»

ЕКОЛОГІЧНІ НАУКИ

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

5(68)

Видавничий дім
«Гельветика»
2026

УДК 502+504

Друкується за рішенням Вченої Ради
Державної наукової установи
«Інститут екологічного відновлення та розвитку України»
(№ 5-26 від 30.09.2026)

Екологічні науки : науково-практичний журнал / Головний редактор Бондар О. І. – К. : Видавничий дім «Гельветика», 2026. – № 5(68). – 416 с.

Головний редактор: Бондар Олександр Іванович, доктор біологічних наук, професор, академік НААН, директор, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України», Україна

Члени редакційної колегії: Єрмішев Олег В'ячеславович, доктор біологічних наук, доцент, доцент кафедри екології, природничих та математичних наук, Комунальний заклад вищої освіти «Вінницька академія безперервної освіти», Україна; **Маркіна Людмила Миколаївна,** доктор технічних наук, професор, начальник центру «Центр підготовки фахівців та наукових кадрів», Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України», Україна; **Машков Олег Альбертович,** доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України», Україна; **Морозова Тетяна Василівна,** доктор біологічних наук, доцент, вчений секретар, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України», Україна; **Риженко Наталія Олександрівна,** доктор біологічних наук, професор, старший науковий співробітник, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України», Україна; **Улицький Олег Андрійович,** доктор геологічних наук, професор, в.о. зав. відділом «Екологічної геології та термодинаміки геосфер», ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України», Україна; **Ізабел О'Ніл ді Машкареньяш Ґайвау** (Isabel O'Neill de Mascarenhas Gaivão), доктор філософії у галузі генетики, ад'юнкт-професор III ступеня, Університет Траз-уж-Монтіш і Алту-Доуру, Португалія; **Томаш Гетманський** (Tomasz Hetmański), доктор габілітований, професор, Директор Інституту біології, Поморська академія у Слупську, Республіка Польща; **Анна Римушка** (Anna Rymuszka), доктор габілітований, професор, професор кафедри фізіології і токсикології, Люблінський католицький університет імені Івана Павла II, Республіка Польща; **Олександр Запорожець** (Oleksandr Zaporozhets), доктор технічних наук, професор, лідер наукового напряму – професор, Дослідницька мережа Лукасевича, Інститут авіації, Республіка Польща

Реєстрація суб'єкта у сфері друкованих медіа: Рішення Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення № 1408 від 25.04.2024 року. Ідентифікатор медіа R30-04036.

Суб'єкт у сфері друкованих медіа – Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України» (вул. Митрополита Василя Липківського, буд. 35, м. Київ, 03035, dnu_iev@ukr.net, тел. (044) 206-31-32).

Журнал включений до Переліку наукових фахових видань України
відповідно до Наказу МОН України № 928 від 11 червня 2026 року (додаток 5)
строком на три роки з 01 червня 2026 року по 31 травня 2029 року з присвоєнням категорії «Б».
Кластер: Науки про Землю та навколишнє середовище.
Спеціальності: Е2 Екологія, Е4 Науки про Землю.

Журнал публікує (після рецензування та редагування) статті, які містять нові теоретичні та практичні здобутки в галузі екологічних наук. Відповідальний редактор: Сікачина В. Г.

Мови розповсюдження: українська, англійська, польська, німецька, французька, іспанська.

Статті у виданні перевірені на наявність плагіату за допомогою програмного забезпечення StrikePlagiarism.com від польської компанії Plagiat.pl.

Журнал включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus International
(Республіка Польща)

© Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України», 2026

ЗМІСТ

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА МІСТА.....9

Ригас Т.Є., Бондар О.І., Поліщук Д.В., Шмандій В.М. Екологічне оцінювання акустичного навантаження та обґрунтування шумозахисних заходів у міському середовищі.....9

Зароченцева О.Д., Тимчук К.Ю. Фенологічна мінливість *Prunus serrulata* Lindl. як індикатор стану зеленої інфраструктури урбанізованих територій (на прикладі м. Чернівці).....18

Суслова О.П., Бойко Л.І. Трансформація таксономічної структури паркового дендроценозу в промисловому місті Північного Степу України.....26

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА.....36

Ващук В.В., Писаревська С.В., Яремко З.М., Тимошук С.В., Кіт Л.Я. Суспільна активність молоді з питань екологічної безпеки в умовах воєнних дій.....36

Врадій О.І. Аналіз трансформації якості недеревної продукції лісу під впливом сучасних безпекових викликів.....42

Дригулич С.П., Орфанова М.М., Дригулич П.Г. Проблемні аспекти щодо звітування та верифікації викидів парникових газів.....50

Ковган Я.О., Герасименко М.В. Просторово-часова диференціація ризику зіткнень птахів із вітроенергетичними установками за результатами CRM-моделювання.....57

Литвин Б.Б., Смірнов О.Є., Таран Н.Ю. Фіторевіталізація у системі екологоцентричних заходів відновлення порушених територій.....62

Михайлюк Ю.Д., Давидчук Д. В. Оцінка екологічної ефективності технічного рішення для зменшення викидів оксиду вуглецю у викидних газах.....71

Sokolov A. V. Comprehensive assessment of the effectiveness of remediation of petroleum-contaminated soils following an accidental oil spill.....75

Яковишина Т.Ф., Москальов М.О. Оцінка екологічного ризику забруднення свинцем ґрунтів, прилеглих до автодоріг, територій різного функціонального призначення.....83

ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ.....90

Lunova O.V. Environmental monitoring and strategies for minimizing the impact of transport infrastructure on the environment.....90

Тараненко А.С., Черевко І.А., Саприкін В.І., Трус І.М. Виявлення прихованих витоків за результатами моніторингу ґрунтових вод на території Києво-Печерської лаври.....97

ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ НАСЛІДКІВ ВОЄННИХ ДІЙ.....106

Артеменко Н.Ф., Присяжний В.І., Морозова Т.В. Геопросторовий аналіз екологічних наслідків воєнних дій на територіях міст Покровськ, Мирноград і Часів Яр за даними дистанційного зондування землі.....106

ЕКОЛОГІЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ.....115

Григор'єв К.В., Алексєєва А.О., Григор'єва Л.І. Смарт-система еколого-радіаційного моніторингу атмосферного повітря.....115

Чугай А.В., Чернякова О.І., Сазанська М.С. Стан повітряного басейну центральних регіонів України як індикатор сталого розвитку.....122

ЕКОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА.....127

Касьяненко Д.Л. Гідро-геоекологічне обґрунтування глибини відкритої розробки гуляйпільського родовища залізистих кварцитів з урахуванням депресійної лійки та напрямів стоку.....127

ЕКОЛОГІЯ ВОДНИХ РЕСУРСІВ.....136

Григорійчук В.В., Пасічник М.Д. Транскордонні аспекти екологічної безпеки водопостачання з інфільтраційних водозаборів у басейні Пруту і Сірету.....136

Дрозд О.М., Дядін Д.В. Порівняння сценаріїв зменшення навантаження на річки Хаджидер і Алкалія методом багатокритеріального оцінювання……142

Diachenko N.O. Transformation of groundwater hydrodynamic and hydrogeochemical regimes under the influence of long-term coal mine operation in the Western Donbas……151

ЕКОЛОГІЯ ЕКОСИСТЕМ……161

Глушак Д.Д., Гнєзділова В.І., Різничук Н.І. Рослинний покрив зсувів національного природного парку «Синьогора» (Горгани)……161

Гнатів І.Р. Процеси механічної денудації схилових територій українських Карпат в басейні Дністра……169

Руденко С.В., Руденко В.П., Руденко С.С., Пахомов О.Є. Роль фауністичних ресурсів в екосистемах України…174

ЕКОЛОГІЯ ЗЕМЕЛЬНИХ РЕСУРСІВ……180

Вовк М.А. Деградація біотичного потенціалу міських ґрунтів в умовах хронічного антропогенного пресингу……180

Гурський І.М., Імамов В.О. Моніторинг екологічного стану ґрунтів урбанізованих територій в умовах зливового навантаження……185

Кучеренко В.А. Оцінка техногенного забруднення агроекосистем важкими металами……191

Панас Н.Є. Біоіндикаційний потенціал ґрунтових мікроорганізмів у системі оцінювання забруднення ґрунту на техногенно трансформованих територіях……197

Сопова Н.В., Сопов Д.С. Міське землекористування і його вплив на ландшафти Черкащини……204

Шевченко Н.О., Понікарчик С.В. Біоконверсія гною ВРХ методом інтегрованого аеробного компостування та вермікультивування……210

ЕКОЛОГІЯ ЗРОШУВАЛЬНИХ СИСТЕМ……216

Блажко А.П. Еколого-меліоративний моніторинг якості дренажно-скидних вод Нижньо-дністровської зрошувальної системи для краплинного зрошення за агрономічними критеріями……216

ЕКОЛОГІЯ ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМ……222

Вишневський А.В., Піціль А.О., Грищенко Д.С., Коморна О.М. Екологічна стійкість лісових екосистем Житомирського Полісся (на прикладі ДП «Олевський лісгосп АПК») в умовах сучасних кліматичних змін……222

Лавріненко В.М. Моніторинговий аналіз флористичного різноманіття лісового фонду північно-східної частини Житомирської області……230

Нонік Л.Ю., Пацева І.Г., Павленко О.С. Адаптація лісових екосистем України до зміни клімату за умов зростання ризику виникнення та поширення лісових пожеж……236

Фіцайло Т.В., Тимченко І.А. Біопродуктивність та депонування вуглецю сосновими насадженнями Київщини…243

Яковенко О.І., Асмаковський Є.В. Динаміка відновлення лісових територій Поліської частини Чернігівської області за показниками індексу NDVI (2016–2025 рр.)……248

ЕКОЛОГІЯ СТІЧНИХ ВОД……259

Себко В.В., Босюк А.С., Махоніна О.С., Нус І.Б. Застосування методу частотної стабілізації електромагнітної взаємодії для екологічного моніторингу стічних вод овочевої консервації……259

Степова О.В., Фролов В.Ф. Аналіз сучасних тенденцій в системі управління відходами очищення стічних вод у Полтавській області……267

Телима С.В., Дятел О.О. Формування біоплівки при очищенні стічних вод в біореакторах із закріпленим біоценозом……273

ЗАГАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ……280

Забарний О.С., Броннікова Л.Ф. Стан агроландшафтів в умовах військового часу та перспективи їх відновлення у післявоєнний період……280

Парахненко В.Г., Мандебура С.В. Екологічна токсикологія як методологічна основа оцінювання впливу біоорганічного землеробства на екологічну безпеку агроекосистем та зниження антропогенного навантаження на довкілля……287

ЗБЕРЕЖЕННЯ БІОЛОГІЧНОГО ТА ЛАНДШАФТНОГО РІЗНОМАНІТТЯ……293

Головко О.В., Лелюх Р.Ю., Кальчук Г.В. Стан популяцій рослин родини *Orchidaceae* на території Національного природного парку «Дермансько-Острозький»……293

Никитюк Ю.А., Вискушенко Д.А., Коморна О.М. Термічна екологічна ніша птахів як інструмент оцінювання кліматичної вразливості та обґрунтування природоохоронних рішень……298

Пасайлюк М.В., Фокшей С.І., Держипільський Л.М., Сухомлин М.М. Збереження *Hericium coralloides* (*Russulales*) на території Національного природного парку «Гуцульщина»: *in situ* та *re-situ* результати……304

Сербенюк Г.А., Паламарчук С.П. Еколого-просвітницька стежка як інструмент екологічної освіти та збереження біорізноманіття парку-пам'ятки садово-паркового мистецтва загальнодержавного значення «Межигір'я»……314

Суходольська І.Л. Таксономічний склад фітопланктону озер Нобельського національного природного парку……322

Сухомлін Л.В., Бакаленко В.А. Просторовий аналіз загроз екосистемам НПП «Бузький гард» засобами ГІС-технологій……331

ЗМІНИ КЛІМАТУ……338

Семергей-Чумаченко А.Б., Шепель В.В. Оцінка метеорологічних умов суднових аварій у Північній Атлантиці за даними реаналізу ERA5……338

ТЕОРЕТИЧНА ЕКОЛОГІЯ……344

Кірейцева Г.В., Хоменко С.В. Оцінювання повноти та якості розкриття екологічної інформації у ESG-звітності підприємств гірничо-металургійного комплексу……344

Машков О.А., Андрійчук Ю.М., Іванов С.Г., Леліченко Д.О. Наукове обґрунтування концепції створення інформаційно-аналітичної системи аналізу екологічної ситуації та раннього сповіщення про можливі екологічні катастрофи……354

Мордатенко І.Л., Солошенко В.С. Адаптивна мінливість та фіторемедіаційні властивості представників родів *Larix* Mill. та *Ribes* L. в умовах техногенного навантаження……363

Терпеливець С.І. Громадянська наука як інструмент екопросвітницької діяльності природоохоронних установ: від збору даних до формування екологічної свідомості……369

УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ……377

Літвак О.А., Літвак С.М. Оцінка чинників формування несанкціонованих сміттєзвалищ у Миколаївській області та напрями запобігання їх утворенню……377

Перебинос А.Р. Оцінювання реалізації ієрархії управління побутовими відходами у регіональному плані міста Києва……387

Sorochynska O.L., Khrutba V.O., Ishchenko V.A., Kolomiets S.V. The system of sustainable management of demolition waste: principles, methods and prospects for development……393

Цибуля С.Д., Кулько Т.В., Костенко І.А., Корнієнко І.В. Стратегічне планування управління побутовими відходами: регіональний аспект та механізми впровадження в Чернігівській області……404

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ……411

CONTENTS

URBAN ENVIRONMENTAL SAFETY 9

Ryhas T., Bondar O., Polishchuk D., Shmandii V. Environmental assessment of acoustic load and justification of noise protection measures in the urban environment 9

Zarochentseva O., Tymchuk K. Phenological Variability of *Prunus serrulata* Lindl. as an Indicator of Green Infrastructure Condition in Urban Areas (A Case Study of Chernivtsi, Ukraine) 18

Suslova O., Boyko L. Transformation of the taxonomic structure of the park dendrocoenoses in the industrial city of the Northern Steppe of Ukraine 26

ENVIRONMENTAL SAFETY 36

Vashchuk V., Pysarevska S., Yaremko Z., Tymoshuk S., Kit L. Social activity of youth in issues of environmental safety in the conditions of military actions 36

Vradii O. Transformation of non-wood forest product quality under the influence of security challenges in conditions of technogenic and military impacts 42

Dryhulych S., Orfanova M., Dryhulych P. Challenging aspects of greenhouse gas emissions reporting and verification 50

Kovhan Ya., Herasymenko M. Spatiotemporal Differentiation Of Bird Collision Risk With Wind Turbines Using Collision Risk Modeling 57

Lytvyn B., Smirnov O., Taran N. Phytorevitalisation as part of an ecocentric approach to the restoration of contaminated areas 62

Mykhailiuk Yu., Davydchuk D. Assessment of environmental effectiveness of a technical solution for reducing carbon monoxide emissions in exhaust gases 71

Sokolov A. Comprehensive assessment of the effectiveness of remediation of petroleum-contaminated soils following an accidental oil spill 75

Yakovyshyna T., Moskalov M. Ecological risk assessment of lead pollution of highway areas soils with various functional purposes 83

ENVIRONMENTAL MONITORING 90

Lunova O.V. Environmental monitoring and strategies for minimizing the impact of transport infrastructure on the environment 90

Taranenko A., Cherevko I., Saprykin V., Trus I. Detection of hidden leaks based on groundwater monitoring results at the Kyiv-Pechersk Lavra 97

ENVIRONMENTAL MONITORING OF WARFARE IMPACTS 106

Artemenko N., Prysiazhnyi V., Morozova T. Spatio-Temporal Geospatial Assessment of the Environmental Impacts of Warfare in Pokrovsk, Myrnohrad, and Chasiv Yar Using Earth Remote Sensing Data 106

ECOLOGY OF ATMOSPHERIC AIR 115

Grygoriev K., Aleksieieva A., Grygorieva L. Smart system for environmental and radiation monitoring of atmospheric air 115

Chugai A., Chernyakova O., Sazanska M. The state of the air basin in the central regions of Ukraine as an indicator of sustainable development 122

INDUSTRIAL ECOLOGY 127

Kasyanenko D. Hydrogeoecological justification of the depth of open-cast mining at the Hulyaypil iron-bearing quartzite deposit, taking into account the depression cone and drainage patterns 127

ECOLOGY OF WATER RESOURCES 136

Hryhoriichuk V., Pasichnyk M. Transboundary Aspects of the Environmental Safety of Water Supply from Infiltration Intakes in the Prut and Siret River Basin 136

ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

Drozd O., Diadin D. Comparison of scenarios for reducing pressures on the Khadzhyder and Alkaliia Rivers using multi-criteria decision analysis……142

Diachenko N.O. Transformation of groundwater hydrodynamic and hydrogeochemical regimes under the influence of long-term coal mine operation in the Western Donbas……151

ECOSYSTEM ECOLOGY……161

Hlushak D., Gniezdilova V., Riznychuk N. Vegetation of landslide ecotopes in "Synogora" National Nature Park (Gorgany mountains)……161

Hnativ I. Processes of mechanical denudation in the slope areas of the Ukrainian Carpathians within the Dniester basin……169

Rudenko S., Rudenko V., Rudenko S., Pakhomov O. The Role of Faunistic Resources in the Ecosystems of Ukraine……174

ECOLOGY OF LAND RESOURCES……180

Vovk M. Degradation of the Biotic Potential of Urboedaphotopes in Central Ukraine Under Chronic Anthropogenic Pressure……180

Hurskiy I., Imamov V. Monitoring the Ecological State of Urban Soils under the Impact of Stormwater Runoff……185

Kucherenko V. Assessment of Technogenic Pollution of Agroecosystems by Heavy Metals……191

Panas N. Bioindication potential of soil microorganisms in the system for assessing soil contamination in technogenically transformed territories……197

Sopova N., Sopov D. Urban land use and its impact on the landscapes of the Cherkasy region……204

Shevchenko N., Ponikarchyk S. Bioconversion of Cattle Manure by Integrated Aerobic Composting and Vermicomposting……210

ECOLOGY OF IRRIGATION SYSTEMS……216

Blazhko A. Ecological and reclamation monitoring of the quality of drainage and discharge waters from the Lower Dniester irrigation system for drip irrigation based on agronomic criteria……216

ECOLOGY OF FOREST ECOSYSTEMS……222

Vyshnevskyi A., Pitsil A., Hryshchenko D., Komorna O. Ecological resilience of forest ecosystems in Zhytomyr Polissya under contemporary climate change: a case study of the State Enterprise «Olevsk Forestry APC»……222

Lavrinenko V. Monitoring-based assessment of floristic diversity in the forest fund of the north-eastern part of Zhytomyr region……230

Nonik L., Patseva I., Pavlenko O. Adaptation of Ukraine's forest ecosystems to climate change under the increasing risk of wildfire occurrence and spread……236

Fitsailo T., Tymchenko I. Bioproductivity and carbon sequestration by pine stands of Kyiv region……243

Yakovenko O., Asmakovskyi Ye. Dynamics of forest area recovery in the Polissia part of Chernihiv region based on NDVI index values (2016–2025)……248

WASTEWATER ECOLOGY……259

Sebko V., Bosiuk A., Makhonina O., Nus I. Application of the frequency stabilisation method of electromagnetic interaction for environmental monitoring of wastewater from vegetable canning……259

Stepova O., Frolov V. Analysis of current trends in the waste management system for wastewater treatment in the Poltava region……267

Telyma S., Diatel O. About the process forming of the biofilm at the wastewater treatment in bioreactors with fixed biocenosis……273

GENERAL ISSUES OF ENVIRONMENTAL SAFETY……280

Zabarnyi O., Bronnikova L. The state of agricultural landscapes under martial law and prospects for their restoration in the post-war period……280

Parakhnenko V., Mandebura S. Environmental toxicology as a methodological framework for assessing the impact of bio-organic farming on the ecological safety of agroecosystems and reducing anthropogenic pressure on the environment……287

CONSERVATION OF BIOLOGICAL AND LANDSCAPE DIVERSITY……293

Holovko O., Leliukh R., Kalchuk G. Population status of Orchidaceae plant species in the territory of the National Nature Park «Dermansko-Ostrozhskyi»……293

Nykytiuk Yu., Vyskushenko D., Komorna O. Thermal ecological niche of birds as a tool for assessing climate vulnerability and supporting conservation decisions……298

Pasailiuk M., Fokshei S., Derzhypilskyi L., Sukhomlyn M. Conservation of *Hericium coralloides* (Russulales) within the Territory of the National Natural Park «Hutsulshchyna»: *In Situ* and *Re-Situ* Results……304

Serbeniuk H., Palamarchuk S. Environmental education trail as a tool for environmental education and biodiversity conservation at the «Mezhyhirya» park-monument of landscape art of National importance……314

Sukhodolska I. Taxonomic structure of phytoplankton in the lakes of the Nobel National Nature Park……322

Sukhomlin L., Bakalenko V. Spatial analysis of threats to the ecosystems of the "Buzkyi Gard" National Nature Park using GIS technologies……331

CLIMATE CHANGE……338

Semerhei-Chumachenko A., Shepel V. Assessment of Meteorological Conditions of Ship Accidents in the North Atlantic Based on ERA5 Reanalysis Data……338

THEORETICAL ECOLOGY……344

Kireitseva H., Khomenko S. Assessment of the completeness and quality of environmental information disclosure in the ESG reporting of mining and metallurgical enterprises……344

Mashkov O., Andriychuk Yu., Ivanov S., Lelichenko D. Scientific substitution of the concept of creating an information and analytical system for analysis of the ecological situation and early warning of possible ecological disasters……354

Mordatenko I., Soloshenko V. Adaptive variability and phytoremediation properties of representatives of the genera *Larix* Mill. and *Ribes* L. under technogenic load……363

Terpelyvets S. Citizen science as a tool for eco-educational activities of nature conservation institutions: from data collection to forming environmental awareness……369

WASTE MANAGEMENT……377

Litvak O., Litvak S. Assessment of the factors contributing to the formation of unauthorized dumpsites in Mykolaiv region and measures for their prevention……377

Perebynos A. Assessment of the implementation of the municipal waste management hierarchy in the Regional Plan of the city of Kyiv……387

Sorochynska O.L., Khrutba V.O., Ishchenko V.A., Kolomiets S.V. The system of sustainable management of demolition waste: principles, methods and prospects for development……393

Tsybulia S., Kulko T., Kostenko I., Korniienko I. Strategic planning of household waste management: regional aspect and implementation mechanisms in the Chernihiv region……404

AUTHORS' CREDENTIALS……411

УДК 504.064.3:711.4
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.1

ЕКОЛОГІЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ АКУСТИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ШУМОЗАХИСНИХ ЗАХОДІВ У МІСЬКОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Ригас Т.Є.[1] (orcid.org/0000-0001-9297-2787),
Бондар О.І.[2] (orcid.org/0000-0002-4488-2282),
Поліщук Д.В.[3] (orcid.org/0000-0002-2426-6861),
Шмандій В.М.[1] (orcid.org/0000-0002-8811-4824)
[1]Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Університетська, 20, 39600, м. Кременчук
[2]Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, 03035, м. Київ
[3]Філія Класичного приватного університету у місті Кременчук
вул. Миколи Залудяка, 3, 39600, м. Кременчук
tinarigs7@gmail.com, ecsafety.sh@gmail.com, dnu_iev@ukr.net, kpudmytro@gmail.com

Транспортний шум – один із чинників погіршення якості екологічного стану міського середовища. В умовах щільної міської забудови розроблення ефективних еколого-шумозахисних заходів потребує проведення екологічних досліджень з урахуванням результатів натурних вимірювань, математичного моделювання та особливостей довкілля міської забудови. Мета дослідження – екологічне оцінювання акустичного навантаження та обґрунтування шумозахисних заходів у міському середовищі на основі комплексного використання результатів натурних вимірювань, аналітичного моделювання й аналізу містобудівних умов.

Дослідження виконано на прикладі транспортно навантаженої території Кременчуцької територіальної громади. Використано результати натурних вимірювань рівнів транспортного шуму, аналітичне моделювання ефективності шумозахисних екранів за моделлю Маекави та аналіз просторової організації території з урахуванням містобудівних обмежень. Встановлено, що еквівалентний рівень транспортного шуму перевищує нормативне значення 55 дБА на 8–17 дБА. Порівняння результатів аналітичного моделювання з даними натурних вимірювань показало систематичне переоцінювання вставних втрат моделлю Маекави на 0,9–3,5 дБА в умовах щільної міської забудови. Зазначено, що реалізація розрахункових висот шумозахисних екранів обмежується вимогами щодо забезпечення нормативного природного освітлення прилеглої забудови, у зв'язку з чим обґрунтовано комплекс конструктивних і природо-орієнтованих шумозахисних заходів, адаптованих до реальних умов.

Удосконалено підхід до екологічного оцінювання акустичного навантаження міського середовища шляхом комплексного врахування результатів натурних вимірювань, аналітичного моделювання та аналізу нормативних містобудівних обмежень під час прийняття відповідних еколого-захисних рішень. Практичне значення одержаних результатів – здатність їх використання під час планування, реконструкції та екологічного супроводу транспортної інфраструктури територіальних громад для обґрунтування шумозахисних заходів, спрямованих на підвищення екологічної безпеки та якості міського середовища.
Ключові слова: екологічне оцінювання; акустичне навантаження; транспортний шум; шумозахисні заходи; міське середовище; містобудівні обмеження; шумозахисний екран; екологічна безпека.

Environmental assessment of acoustic load and justification of noise protection measures in the urban environment. Ryhas T., Bondar O., Polishchuk D., Shmandii V.

Traffic noise is one of the major factors deteriorating environmental safety and the quality of the urban environment. In densely built-up urban areas, the development of effective noise mitigation measures requires comprehensive environmental studies integrating field measurements, analytical modelling, and the assessment of urban planning conditions. The aim of this study is to perform an environmental assessment of urban acoustic load and to substantiate noise mitigation measures based on the integrated use of field measurements, analytical modelling, and urban planning analysis.

The study was conducted using a traffic-intensive area of the Kremenchuk Territorial Community as a case study. Field measurements of road traffic noise levels, analytical modelling of noise barrier performance using the Maekawa model, and an analysis of the spatial characteristics of the urban area considering urban planning constraints were applied. The results demonstrated that the equivalent traffic noise level exceeded the regulatory limit of 55 dBA by 8–17 dBA. A comparison of analytical calculations with field measurements revealed that the Maekawa model systematically overestimated the insertion loss of noise barriers by 0.9–3.5 dBA under conditions of dense urban development. It was also established that the implementation of the calculated barrier heights is constrained by the requirements for maintaining adequate natural daylighting of adjacent residential buildings. Therefore, a set of structural and nature-based noise mitigation measures adapted to real urban planning conditions was substantiated.

© Ригас Т.Є., Бондар О.І., Поліщук Д.В., Шмандій В.М., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

The study further develops an approach to the environmental assessment of urban acoustic load through the integrated consideration of field measurement data, analytical modelling results, and regulatory urban planning constraints in the selection of noise mitigation solutions. The practical significance of the obtained results lies in their applicability to the planning, reconstruction, and environmental management of transport infrastructure in territorial communities for substantiating noise mitigation measures aimed at improving environmental safety and the quality of the urban environment. *Key words:* environmental assessment; acoustic load; road traffic noise; noise mitigation measures; urban environment; urban planning constraints; noise barrier; environmental safety.

Постановка проблеми. Формування здоров'яорієнтованих територіальних громад є одним із пріоритетних напрямів сучасної екологічної політики та сталого розвитку урбанізованих територій. Реалізація цієї концепції передбачає комплексне оцінювання екологічної якості міського середовища, яка визначається станом його основних компонентів та їхнім впливом на здоров'я населення, безпеку проживання і якість життя [1, 2].

Екологічна якість міського середовища формується під впливом сукупності взаємопов'язаних компонентів, які визначають санітарно-гігієнічні, екологічні та комфортні умови проживання населення. До таких компонентів належать якість атмосферного повітря, акустичне середовище, стан зеленої інфраструктури, якість водних ресурсів та ефективність системи поводження з відходами. Комплексне оцінювання зазначених компонентів є необхідною передумовою розроблення науково обґрунтованих управлінських рішень, спрямованих на забезпечення екологічної безпеки та сталого розвитку територіальних громад [1, 2].

Одним із ключових компонентів екологічної якості міського середовища є акустичне навантаження, оскільки транспортний шум належить до найбільш поширених екологічних чинників, що негативно впливають на здоров'я населення, психоемоційний стан, комфортність проживання та якість життя. В умовах щільної міської забудови акустичне навантаження визначається не лише інтенсивністю транспортних потоків, а й особливостями просторової організації території, які впливають на поширення, багаторазове відбиття звукової енергії [3–5].

Для більшості урбанізованих територій характерним є поєднання високої інтенсивності автомобільного руху зі щільною житловою забудовою, що призводить до формування зон підвищеного акустичного навантаження та ускладнює забезпечення нормативних рівнів шуму. За таких умов підвищення екологічної якості міського середовища потребує комплексного екологічного оцінювання акустичного навантаження, яке поєднує результати натурних вимірювань, аналітичного моделювання та аналізу містобудівних умов як основу для обґрунтування ефективних шумозахисних заходів [6].

Для Кременчуцької територіальної громади проблема транспортного шуму є особливо актуальною у зв'язку зі зростанням інтенсивності автомобільного руху, історично сформованою щільною забудовою центральної частини міста та необхідністю впровадження сучасних підходів до управління акустичним середовищем як складовою забезпечення екологічної якості міського середовища. Це обумовлює необхідність екологічного оцінювання акустичного навантаження та наукового обґрунтування комплексу шумозахисних заходів, ефективність яких підтверджена результатами натурних досліджень і враховує особливості міської забудови.

Актуальність дослідження. Незважаючи на впровадження в європейських країнах програм управління транспортним шумом, шумове забруднення залишається одним із провідних екологічних чинників, що негативно впливають на здоров'я населення та екологічну якість міського середовища. Відповідно до *WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region* [3], рекомендований рівень транспортного шуму не повинен перевищувати 53 дБ Lden, оскільки його перевищення пов'язане зі зростанням ризику серцево-судинних захворювань, порушень сну, погіршенням психоемоційного стану та зниженням якості життя населення.

За оцінками Європейського агентства з навколишнього середовища [5] понад 30 % населення Європи проживає в умовах транспортного шуму, що перевищує рекомендовані Всесвітньою організацією охорони здоров'я рівні, а автомобільний транспорт залишається основним джерелом акустичного навантаження в містах. Щорічні соціальні та медичні наслідки такого впливу підтверджують, що проблема транспортного шуму виходить за межі суто санітарно-гігієнічної та потребує розгляду як одного з пріоритетних напрямів забезпечення екологічної якості міського середовища.

Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених транспортному шуму та шумозахисних екранів, питання комплексного екологічного оцінювання акустичного навантаження в умовах щільної міської забудови з урахуванням результатів натурних вимірювань, аналітичного моделювання та містобудівних обмежень залишається недостатньо дослідженим [6].

Сучасний розвиток концепції здоров'яорієнтованих територіальних громад потребує розгляду акустичного навантаження не лише як санітарно-гігієнічного показника, а як одного з ключових компонентів екологічної якості міського середовища. За таких умов оцінювання ефективності шумозахисних заходів повинно ґрунтуватися на комплексному аналізі результатів натурних вимірювань, аналітичного моделювання та особливостей міської забудови. Такий підхід дозволяє не лише оцінити ефективність окремих шумозахисних заходів, а й сформувати науково обґрунтовані рекомендації щодо управління

акустичним середовищем як складовою підвищення екологічної якості міського середовища [6].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження спрямоване на вирішення актуального науково-практичного завдання щодо підвищення екологічної безпеки та комфортності міського середовища шляхом зниження негативного впливу транспортного шуму на населення. Отримані результати сприяють удосконаленню підходів до екологічного оцінювання акустичного навантаження транспортно навантажених територій та обґрунтуванню ефективних шумозахисних заходів з урахуванням містобудівних обмежень. Практичне значення дослідження полягає у можливості використання запропонованих рекомендацій при плануванні, реконструкції та екологічного супроводу транспортної інфраструктури територіальних громад, що сприятиме зниженню акустичного навантаження, підвищенню екологічної безпеки, комфортності проживання та збереженню здоров'я населення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Екологічні дослідження транспортного шуму протягом останніх десятиліть еволюціонували від оцінювання рівнів шуму як окремого фізичного чинника до комплексного аналізу акустичного середовища як складової екологічної якості міських територій. Сучасні дослідження підтверджують, що акустичне навантаження є одним із важливих екологічних факторів, який впливає на стан здоров'я населення, комфортність проживання та якість міського середовища. У зв'язку з цим поряд із традиційним контролем рівнів шуму дедалі більшого розвитку набувають підходи, орієнтовані на комплексне оцінювання акустичного середовища під час планування та управління розвитком урбанізованих територій [6].

Для оцінювання акустичного навантаження використовують аналітичні, емпіричні та чисельні методи прогнозування поширення звуку. Аналітичні моделі широко застосовуються на етапі попереднього інженерного оцінювання завдяки простоті використання, мінімальній кількості необхідних вихідних даних і можливості оперативного порівняння різних варіантів шумозахисних заходів. Чисельні методи, зокрема метод скінченних елементів (FEM), метод граничних елементів (BEM) та FDTD-моделювання, забезпечують вищу точність прогнозування, однак потребують детального опису геометрії території, значних обчислювальних ресурсів і спеціалізованого програмного забезпечення [7].

Серед аналітичних моделей найбільшого поширення набула модель Маекави, що ґрунтується на оцінюванні дифракції звукових хвиль за числом Френеля. Завдяки простоті реалізації, незначній кількості необхідних вихідних параметрів та достатній точності для відкритої місцевості вона залишається одним із базових методів попереднього прогнозування ефективності шумозахисних екранів і широко використовується під час проєктування транспортної інфраструктури [8].

Подальший розвиток цього підходу спрямований на уточнення меж застосування аналітичних моделей. Автори роботи [9] встановили, що модель Маекави забезпечує достатню точність прогнозування для середньочастотного діапазону транспортного шуму в умовах відкритого простору. Papadakis та Stavroulakis [7] показали, що точність аналітичних моделей істотно залежить від взаємного розташування джерела шуму, шумозахисного екрана та приймача, а найбільші похибки виникають у випадках їх розміщення поблизу екрана. Практичне підтвердження цих висновків наведено у роботі Martinez-Orozco та Barba [10] які за результатами натурних вимірювань на автомобільних дорогах Іспанії встановили систематичне завищення розрахункової ефективності шумозахисних екранів порівняно з фактичними значеннями, що пояснюється впливом метеорологічних умов, характеристик дорожнього покриття та особливостей поширення звуку в реальному міському середовищі.

Поряд із розвитком методів прогнозування активно досліджуються конструктивні способи зниження акустичного навантаження. Ramadan та Ahmed [11] показали, що використання Т-подібного верхнього профілю та збільшення висоти шумозахисного екрана забезпечують додаткове зниження рівня транспортного шуму. Аналогічні висновки отримали Lam з колегами [12], які підтвердили визначальний вплив геометричних параметрів конструкції на її акустичну ефективність. Водночас автори [13] довели, що використання картографування шуму під час вибору місць встановлення шумозахисних споруд дозволяє суттєво скоротити площі територій із перевищенням нормативних рівнів шуму.

Особливу увагу сучасні дослідники приділяють оцінюванню акустичного навантаження в умовах щільної міської забудови. В роботі [4] встановили, що багаторазові відбиття звукових хвиль від фасадів будівель у вуличних каньйонах істотно знижують фактичну ефективність шумозахисних екранів порівняно з розрахунками, виконаними для умов відкритої місцевості. Водночас автори [14] показали перспективність використання активних систем шумоподавлення для зниження транспортного шуму в міських умовах, однак їх ефективне застосування потребує складного технічного забезпечення та значних економічних витрат. Це зумовлює збереження провідної ролі традиційних пасивних шумозахисних заходів під час забезпечення нормативних рівнів шуму на урбанізованих територіях.

Серед вітчизняних досліджень слід відзначити роботи Абракітова, Скрипника та Нестеренка [15], у яких систематизовано конструктивні типи шумозахисних екранів і наведено рекомендації щодо їх застосування в умовах міської забудови України. Методичні засади оцінювання транспортного шуму та проєктування шумозахисних споруд регламентовані ДСТУ-Н Б В.1.1-33:2013 [16], однак зазначені документи орієнтовані переважно на інженерне

проєктування і недостатньо враховують вплив особливостей щільної міської забудови на формування акустичного навантаження.

Виділення невирішених аспектів проблеми. Незважаючи на значний обсяг досліджень, присвячених екологічному оцінюванню транспортного шуму, прогнозуванню ефективності шумозахисних екранів та вдосконаленню їх конструктивних рішень більшість науковців розглядає окремі аспекти проблеми. Існуючі дослідження переважно зосереджені на розвитку методів акустичного моделювання, удосконаленні розрахункових моделей або оцінюванні ефективності окремих шумозахисних конструкцій, тоді як питання комплексного екологічного оцінювання акустичного навантаження міського середовища висвітлено недостатньо.

Особливої актуальності ця проблема набуває в умовах щільної міської забудови, де формування акустичного середовища визначається не лише інтенсивністю транспортних потоків, а й особливостями просторової організації території, багаторазовими відбиттями звукових хвиль від фасадів будівель, містобудівними обмеженнями та необхідністю забезпечення нормативних рівнів шуму на територіях житлової забудови. За таких умов застосування лише аналітичних моделей або лише результатів натурних вимірювань не забезпечує достатнього наукового обґрунтування вибору ефективних шумозахисних заходів, що зумовлює необхідність їх комплексного використання під час екологічного оцінювання акустичного навантаження [6].

Новизна. Наукова новизна одержаних результатів полягає в удосконаленні підходу до екологічного оцінювання акустичного навантаження транспортно навантажених ділянок міської забудови на основі комплексного використання результатів натурних вимірювань, аналітичного моделювання та аналізу містобудівних обмежень при обґрунтуванні шумозахисних заходів.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічною основою дослідження є комплексний підхід до екологічного оцінювання акустичного навантаження міського середовища, який передбачає інтеграцію результатів натурних вимірювань, аналітичного моделювання та аналізу містобудівних умов. На відміну від традиційних підходів, орієнтованих переважно на прогнозування ефективності окремих шумозахисних споруд або оцінювання рівнів транспортного шуму, запропонований підхід розглядає акустичне навантаження як один із компонентів екологічної якості міського середовища, що формується під впливом сукупності природних, технічних та просторових чинників.

Комплексне поєднання результатів натурних вимірювань, аналітичного моделювання та аналізу особливостей міської забудови дозволяє оцінити не лише фактичний рівень акустичного навантаження, а й визначити чинники, що впливають на його формування, встановити обмеження застосування окремих шумозахисних заходів та обґрунтувати їх вибір з урахуванням реальних умов функціонування міського середовища. Методологія екологічного оцінювання акустичного навантаження наведена на рис. 1.

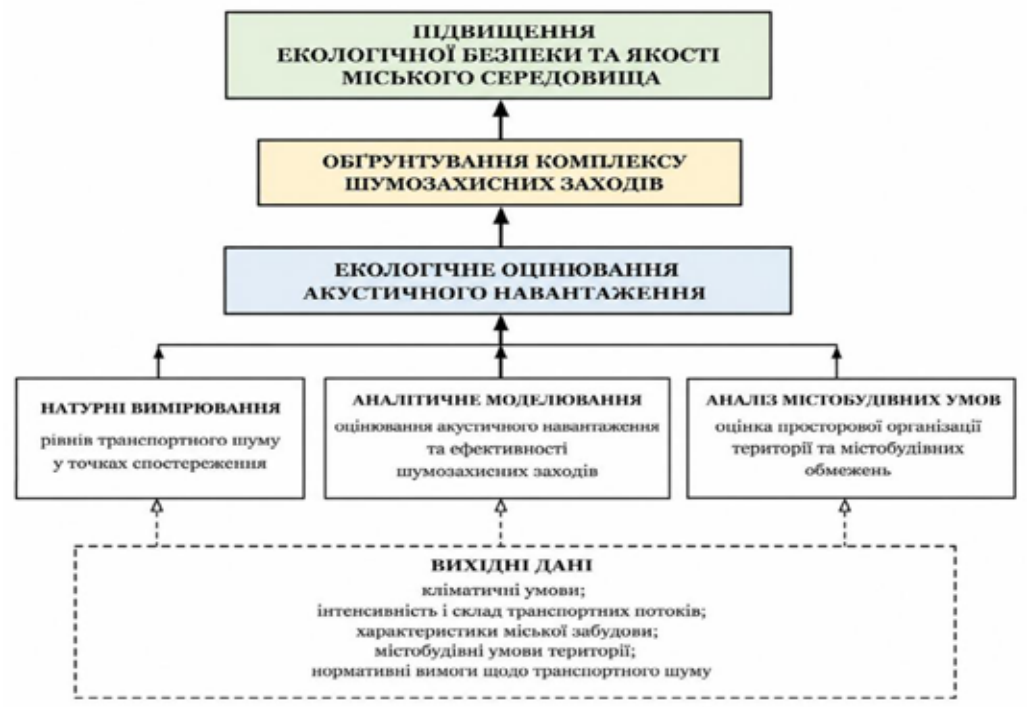


Рис. 1. Структурно-логічна схема екологічного оцінювання акустичного навантаження та обґрунтування комплексу шумозахисних заходів у міському середовищі

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

Запропонований підхід може бути використаний як методологічна основа для екологічного оцінювання акустичного навантаження урбанізованих територій, а також адаптований до дослідження інших компонентів екологічної якості міського середовища під час розроблення заходів, спрямованих на забезпечення екологічної безпеки, та сталого розвитку територіальних громад.

Виклад основного матеріалу. Для апробації запропонованого підходу до екологічного оцінювання акустичного навантаження було обрано ділянку перехрестя вулиць Кагала та Покровської, розташовану в центральній частині Кременчуцької територіальної громади. Досліджувана територія характеризується інтенсивним автомобільним рухом, щільною багатоповерховою забудовою та незначною відстанню між проїзною частиною і житловими будинками, що створює умови для формування підвищеного акустичного навантаження внаслідок поєднання прямого та відбитого звукового поля.

Вибір цієї ділянки обумовлений її репрезентативністю для центральної частини міста, де поєднуються висока транспортна інтенсивність, сформований вуличний каньйон та містобудівні обмеження щодо застосування традиційних шумозахисних споруд. Просторове розташування джерел шуму, контрольних точок та запропонованих місць встановлення шумозахисних екранів наведено на рис. 2.

Оцінювання акустичного навантаження виконували шляхом проведення натурних вимірювань еквівалентного рівня транспортного шуму в чотирьох контрольних точках, розташованих на різній відстані від проїзної частини та в умовах різного ступеня екранування забудовою. Такий вибір точок забезпечив можливість оцінити особливості формування акустичного середовища як безпосередньо біля транспортного потоку, так і у внутрішньодворових просторах житлової забудови.

Натурні вимірювання еквівалентного рівня транспортного шуму проводили в години максимального транспортного навантаження (07:00–09:00 та 17:00–19:00), а також у міжпіковий період (12:00–14:00). У кожній точці спостереження вимірювання виконували протягом 20 хв із фіксацією показників через двохвилинні інтервали. За результатами десяти послідовних вимірювань визначали середнє значення еквівалентного рівня шуму LAeq, яке використовували для подальшого аналізу. Результати натурних вимірювань наведено в табл. 1.

Аналіз результатів натурних вимірювань показав, що в усіх точках спостереження еквівалентний рівень транспортного шуму перевищує гранично допустимий рівень шуму для територій житлової забудови, установлений ДСН 3.3.6.037-99 [17]. Найбільші перевищення зафіксовано біля фасадів житлових будівель, безпосередньо прилеглих до проїзної частини, де рівень шуму досягає 70–72 дБА, що на 15–17 дБА перевищує нормативне значення. У внутрішньодворових просторах рівень шуму знижується до 63–66 дБА, однак також залишається вищим за допустимий на 8–11 дБА.

Отримані результати свідчать, що навіть зі збільшенням відстані від транспортного потоку нормативний акустичний режим не забезпечується, а просторові особливості забудови істотно впливають на формування акустичного навантаження. Це обумов-

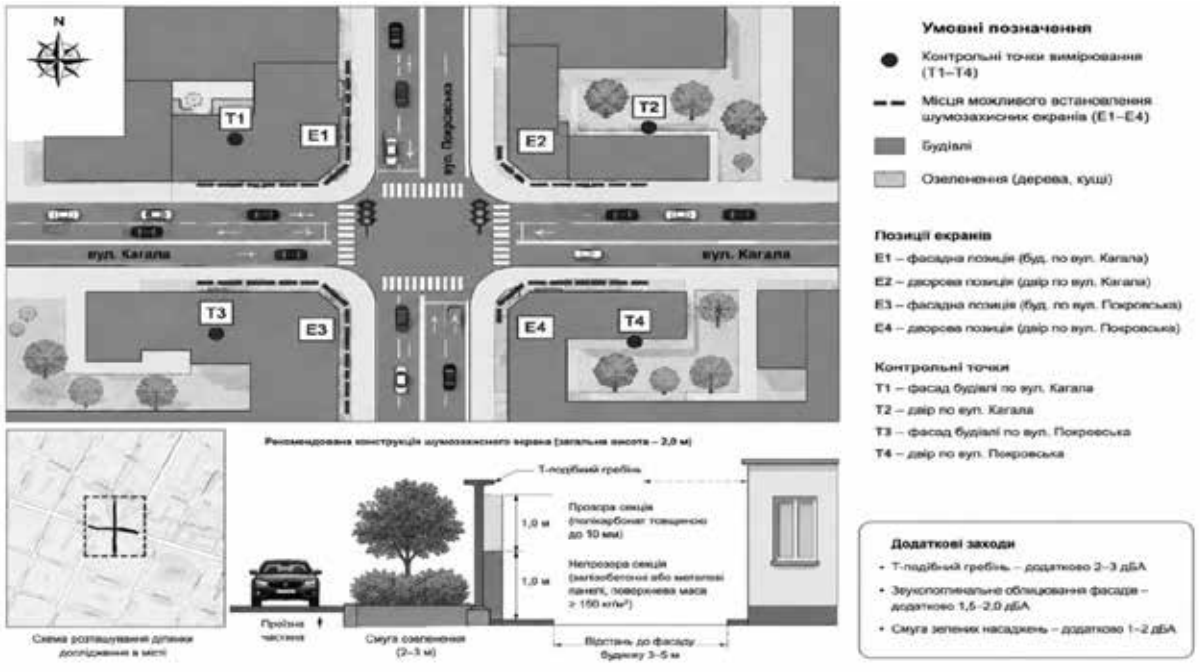


Рис. 2. Схема розташування ділянки дослідження, контрольних точок вимірювання та місць можливого встановлення шумозахисних екранів

Таблиця 1

Результати натурних вимірювань еквівалентного рівня звуку

Точка	Відстань від осі, м	LAeq пік, дБА	LAeq позапік, дБА	Перевищення (пік), дБА
Т1 – фасад вул. Кагала	3	72	65	17
Т2 – двір вул. Кагала	12	66	59	11
Т3 – фасад вул. Покровської	4	70	63	15
Т4 – двір вул. Покровської	11	63	57	8

Таблиця 2

Розрахункові параметри шумозахисних екранів

Поз.	Захищена точка	d_s, м	d_j, м	Необх. IL, дБА	N	h розр., м	h прийн., м	Дефіцит IL, дБА
Е1	Т1 (фасад Кагала)	3,0	3,0	17	3,06	4,1	2,0	8,3
Е2	Т2 (двір Кагала)	7,0	12,0	11	1,34	3,2	2,0	4,5
Е3	Т3 (фасад Покровської)	4,0	4,0	15	2,51	3,7	2,0	6,8
Е4	Т4 (двір Покровської)	5,5	11,0	8	0,71	2,3	2,0	0,7

лює необхідність подальшого аналітичного оцінювання ефективності шумозахисних заходів з урахуванням містобудівних умов досліджуваної території.

Для подальшого оцінювання можливостей зниження акустичного навантаження було виконано аналітичне моделювання ефективності шумозахисного екрана. Як базову модель використано аналітичну залежність Маекави, яка широко застосовується для попереднього оцінювання вставних втрат шумозахисних екранів на основі дифракції звукових хвиль. Використання цієї моделі дозволяє визначити необхідні параметри шумозахисного екрана залежно від взаємного розташування джерела шуму, екрана та точки спостереження.

$$IL = 10\log(3 + 20N),\ N = \frac{A + B - d}{\lambda},$$

де: IL – вставні втрати шумозахисного екрана (Insertion Loss), дБА; N – число Френеля; A – відстань від джерела шуму до верхньої кромки екрана, м; B – відстань від верхньої кромки екрана до точки приймання, м; d – пряма відстань між джерелом шуму та точкою приймання без екрана, м; λ – довжина звукової хвилі, м.

У розрахунках прийнято довжину звукової хвилі λ = 0,68 м, що відповідає частоті 500 Гц за швидкості поширення звуку 340 м/с. Висоту джерела шуму прийнято h_s=0,5h м, а висоту точки спостереження – h_r=1,5 м. Необхідну висоту шумозахисного екрана визначали методом послідовного підбору до досягнення розрахункового значення вставних втрат, достатнього для забезпечення нормативного рівня шуму в точках спостереження. Результати розрахунків наведено в табл. 2.

Результати аналітичного моделювання показали, що для забезпечення нормативного рівня транспортного шуму необхідна висота шумозахисних екранів становить від 2,3 до 4,1 м залежно від просторового розташування точки спостереження (табл. 2). Найбільші значення отримано для позицій, розташованих безпосередньо біля фасадів житлових будівель, тоді як для внутрішньодворових територій розрахункова висота екранів є меншою, що відповідає зниженню акустичного навантаження зі збільшенням відстані від транспортного потоку.

Одержані результати характеризують потенційну ефективність шумозахисних екранів, визначену за аналітичною моделлю. Для оцінювання відповідності результатів аналітичного моделювання фактичним умовам поширення транспортного шуму проведено їх порівняння з результатами натурних вимірювань, виконаних після встановлення експериментального шумозахисного екрана. Результати порівняння аналітичних розрахунків і натурних вимірювань наведено в табл. 3 та на рис. 3.

Аналіз результатів, наведених у табл. 3 та на рис. 3, показав, що модель Маекави достатньо точно відображає загальні закономірності зміни ефективності шумозахисних екранів. Водночас у реальних умовах щільної міської забудови розрахункові значення вставних втрат систематично перевищують результати натурних вимірювань на 0,9–3,5 дБА. Найбільші розбіжності встановлено для позицій Е1 та Е3, розташованих поблизу фасадів житлових будівель. Це свідчить про суттєвий вплив багаторазових відбиттів і дифракції звукових хвиль між фасадами будівель, що не враховується аналітичною моделлю [4]. Отримані результати підтверджують необхідність урахування містобудівних особливостей під час екологічного оцінювання акустичного навантаження в умовах щільної міської забудови.

Таблиця 3

Порівняння аналітичних розрахунків та натурних вимірювань ефективності шумозахисного екрана

Позиція	IL розрах., дБА	IL натур., дБА	ΔIL, дБА	k	IL при h=2,0 м, дБА	Дефіцит IL, дБА
Е1 – фасад вул. Кагала	17,0	13,8	3,2	0,81	8,7	8,3
Е2 – двір вул. Кагала	11,0	9,2	1,8	0,84	6,5	4,5
Е3 – фасад вул. Покровської	15,0	11,5	3,5	0,77	8,2	6,8
Е4 – двір вул. Покровської	8,0	7,1	0,9	0,89	7,3	0,7

Примітка. k – коефіцієнт відповідності (відношення натурно виміряних вставних втрат до розрахункових).

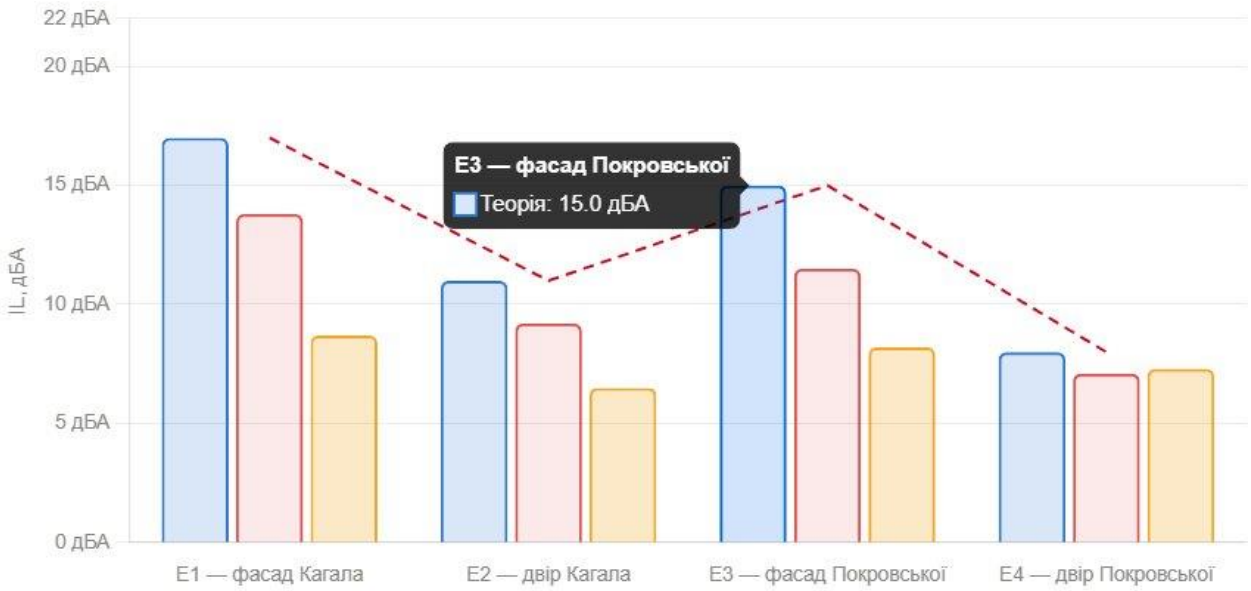


Рис. 3. Порівняння теоретичних, натурних і фактично досяжних (h = 2,0 м) вставних втрат для чотирьох позицій шумозахисного екрана. Пунктирна лінія – мінімально необхідне значення вставних втрат для досягнення нормативного рівня шуму 55 дБА

Подальший аналіз містобудівних умов досліджуваної території показав, що реалізація шумозахисних екранів розрахунковою висотою 2,3–4,1 м призведе до погіршення умов природного освітлення приміщень перших поверхів прилеглих житлових будинків. Максимально допустиму висоту екрана визначали шляхом геометричного аналізу з урахуванням вимог чинних будівельних норм [18–21]. За результатами розрахунків прийнято граничну висоту 2,0 м. За такого обмеження фактично досяжні вставні втрати становлять 8,2–8,7 дБА, що є недостатнім для позицій Е1–Е3, де дефіцит акустичного захисту досягає 4,5–8,3 дБА.

З огляду на містобудівні обмеження для підвищення ефективності шумозахисного екрана без збільшення його висоти запропоновано комплекс конструктивних і природоорієнтованих заходів. Використання Т-подібного гребеня верхньої кромки забезпечує додаткове зниження рівня шуму на 2–3 дБА [10]. Застосування звукопоглинального облицювання непрозорої секції екрана з коефіцієнтом звукопоглинання $\alpha \geq 0{,}8$ на частоті 500 Гц сприяє зменшенню впливу відбитого звукового поля ще на 1,5–2,0 дБА [9]. Деревно-чагарникова смуга озеленення між транспортним потоком і шумозахисним екраном забезпечує додаткове зниження акустичного навантаження на 1–2 дБА [22]. Комплексне застосування запропонованих заходів дозволяє компенсувати дефіцит акустичного захисту в межах 4,5–7,0 дБА та забезпечити нормативний рівень шуму для позицій Е2–Е4. Для позиції Е1, де дефіцит становить 8,3 дБА, доцільно додатково передбачити зміну функціонального призначення приміщень першого поверху або встановлення шумозахисних вікон класу не нижче 3 [23].

На основі результатів натурних вимірювань, аналітичного моделювання та аналізу містобудівних обмежень запропоновано комплекс шумозахисних заходів для транспортно навантажених ділянок щільної міської забудови (рис. 4). Він передбачає застосування шумозахисного екрана загальною висотою 2,0 м, що складається з непрозорої нижньої звукопоглинальної секції висотою 1,0 м із

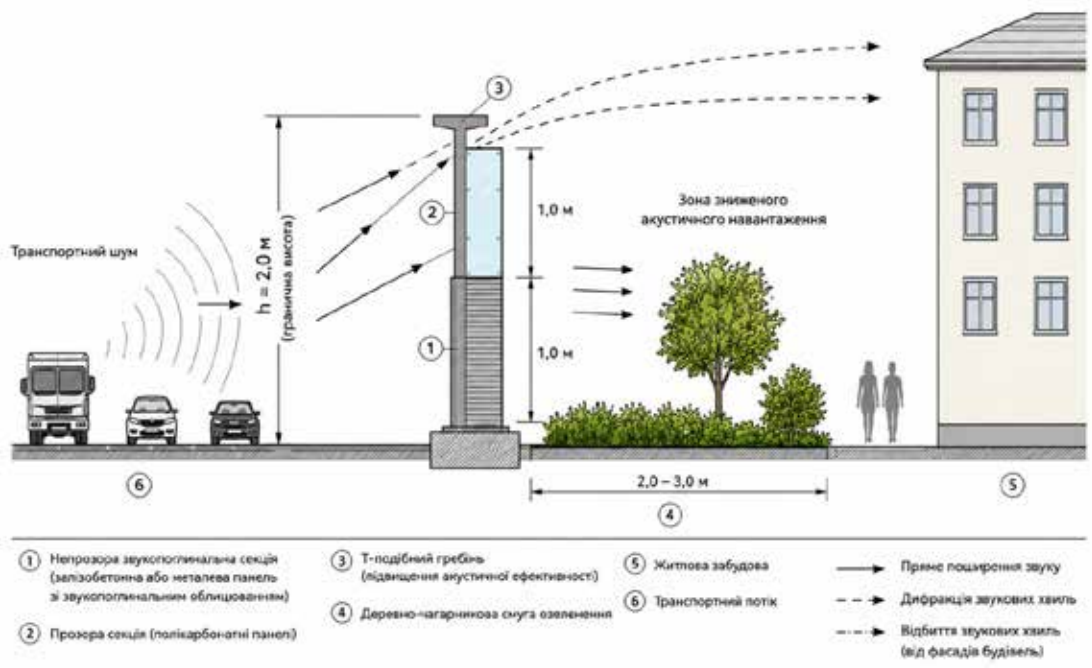


Рис. 4. Рекомендований комплекс шумозахисних заходів для транспортно навантажених ділянок щільної міської забудови

залізобетонних або металевих панелей (поверхнева маса не менше 150 кг/м²) та прозорої верхньої секції висотою 1,0 м із полікарбонатних панелей, обладнаної Т-подібним гребенем. Додатковим елементом комплексу є деревно-чагарникова смуга озеленення. Запропоноване рішення дозволяє підвищити акустичну ефективність шумозахисту, зберігаючи нормативні умови природного освітлення та оглядовість для учасників дорожнього руху.

Запропонований комплекс шумозахисних заходів дозволяє забезпечити екологічно обґрунтоване зниження акустичного навантаження на прилеглу житлову забудову. На відміну від традиційного підходу, орієнтованого виключно на збільшення висоти шумозахисного екрана, запропоноване рішення базується на комплексному використанні конструктивних і природоорієнтованих заходів, адаптованих до реальних умов функціонування міського середовища.

Висновки. Виконано екологічне оцінювання акустичного навантаження транспортно навантаженої ділянки Кременчуцької територіальної громади на основі натурних вимірювань. Встановлено, що еквівалентний рівень транспортного шуму в усіх точках спостереження перевищує нормативне значення 55 дБА на 8–17 дБА, причому найбільші перевищення зафіксовано поблизу фасадів житлової забудови, що свідчить про необхідність впровадження шумозахисних заходів.

Аналітичне моделювання ефективності шумозахисних екранів із використанням моделі Маекави засвідчило, що для забезпечення нормативного акустичного режиму необхідна висота екранів становить 2,3–4,1 м. Порівняння результатів моделювання з даними натурних вимірювань підтвердило придатність моделі для попереднього оцінювання ефективності шумозахисних заходів, водночас виявлено систематичне переоцінювання вставних втрат на 0,9–3,5 дБА в умовах щільної міської забудови.

Зазначено, що реалізація розрахункових висот екранів обмежується необхідністю забезпечення нормативного природного освітлення прилеглої житлової забудови. З огляду на це, максимально допустиму висоту шумозахисного екрана прийнято 2,0 м.

Обґрунтовано комплекс конструктивних і природо-орієнтованих шумозахисних заходів**,** який передбачає використання шумозахисного екрана зі звукопоглинальною нижньою секцією, Т-подібним гребенем і деревно-чагарниковою смугою озеленення. Комплексне застосування запропонованих заходів дозволяє компенсувати дефіцит акустичного захисту без збільшення висоти шумозахисного екрана та забезпечити нормативний рівень шуму для більшості досліджених позицій**.**

Запропонований підхід до екологічного оцінювання акустичного навантаження**,** який поєднує натурні вимірювання, аналітичне моделювання та аналіз містобудівних обмежень, може бути використаний під час планування, реконструкції та екологічного супроводу транспортно навантажених ділянок міської забудови для обґрунтування ефективних шумозахисних заходів і підвищення якості міського середовища.

Перспективи використання результатів полягають у застосуванні запропонованого підходу для екологічного оцінювання акустичного навантаження на ділянках міської забудови з урахуванням місце-

вих містобудівних та природно-кліматичних умов. Результати досліджень можуть використовуватися під час розроблення заходів із підвищення акустичного комфорту, підготовки містобудівної документації, планування реконструкції вулично-дорожньої мережі та обґрунтування природо-орієнтованих рішень.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на вдосконалення методів комплексного екологічного оцінювання акустичного навантаження шляхом інтегрування акустичних характеристик із показниками якості атмосферного повітря, озеленення, мікроклімату та комфортності міського середовища, а також на розроблення інтегральних критеріїв оцінювання екологічної безпеки транспортно навантажених територій.

Конфлікт інтересів: один з авторів є головним редактором журналу. Для забезпечення незалежності редакційного процесу рукопис розглядався уповноваженим редактором, який не перебував у підпорядкуванні автора та не мав конфлікту інтересів. Автор не брав участі у відборі рецензентів, процесі рецензування та прийнятті рішення щодо публікації статті. Рукопис пройшов стандартну процедуру подвійного сліпого рецензування.

Література

1. Ryhas T. Ye. Integrated model of ecological safety and sustainable development of a health-oriented urban territorial community. Visnyk of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. 2026. Vol. 1, № 2. P. 63–70. DOI: https://doi.org/10.32782/1995-0519.2026.1.2.7.
2. Ryhas T., Shmandii V. Ambient air quality assessment in the Kremenchuk Territorial Community based on the environmental risk concept. Ecological Safety and Balanced Use of Resources. 2026. Vol. 17, № 1. P. 101–114. DOI: https://doi.org/10.63341/esbur/1.2026.101.
3. World Health Organization Regional Office for Europe. *Environmental Noise Guidelines for the European Region*. Copenhagen : WHO Regional Office for Europe, 2018. 160 p.
4. Wu S., Huang Y., Chen Q., Yang G. Noise Propagation and Mitigation in High-Rise Buildings Under Urban Traffic Impact. Buildings. 2026. Vol. 16, № 4. Art. 883. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings16040883.
5. European Environment Agency. *Environmental Noise in Europe 2023*. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2023.
6. Kang J. Soundscape in City and Built Environment: Current Developments and Design Potentials. City and Built Environment. 2023. Vol. 1. Article 1. DOI: https://doi.org/10.1007/s44213-022-00005-6.
7. Papadakis N. M., Stavroulakis G. E. Finite element method for the estimation of insertion loss of noise barriers: Comparison with various formulae (2D). Urban Science. 2020. Vol. 4, № 4. Art. 77. DOI: https://doi.org/10.3390/urbansci4040077.
8. Maekawa Z. Noise reduction by screens. Applied Acoustics. 1968. Vol. 1, № 3. P. 157–173. DOI: https://doi.org/10.1016/0003-682X(68)90020-0.
9. Liu M., Chen S., Wu C. Calculation of noise barrier insertion loss based on varied vehicle frequencies. Applied Sciences. 2018. Vol. 8, № 1. Art. 100. DOI: https://doi.org/10.3390/app8010100.
10. Martinez-Orozco J. M., Barba A. Determination of insertion loss of noise barriers in Spanish roads. Applied Acoustics. 2022. Vol. 185. Art. 108409. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108409.
11. Ramadan H. I., Ahmed A. Studying the Effect of Noise Barrier Characteristics on Traffic Noise in Urban Areas. Civil and Environmental Engineering. 2024. Vol. 20, № 2. P. 824–836. DOI: https://doi.org/10.2478/cee-2024-0061.
12. Lam G. C. K., Leung D. Y. C., Demael G. Noise Barriers as a Mitigation Measure for Highway Traffic Noise: Empirical Evidence from Three Study Cases. Journal of Environmental Management. 2024. Vol. 370. Art. 122890. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122890.
13. He J., Qiu H., Li Z. Traffic Noise Reduction Strategy in a Large City and an Analysis of Its Effect. Applied Sciences. 2022. Vol. 12, № 12. Art. 6027. DOI: https://doi.org/10.3390/app12126027.
14. Xu J., Li C., Wang H. Development and Testing of an Active Noise Control System for Urban Road Traffic Noise. Applied Sciences. 2024. Vol. 14, № 1. Art. 175. DOI: https://doi.org/10.3390/app14010175.
15. Абракітов В. Є., Скрипник О. С., Нестеренко С. В. Шумозахисні екрани як засіб оптимізації шумового режиму. Комунальне господарство міст. 2021. Т. 1, вип. 161. С. 296–300.
16. ДСТУ-Н Б В.1.1-33:2013. Настанова з розрахунку та проектування захисту від шуму сельбищних територій. Київ : Мінрегіон України, 2014. 42 с.
17. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. Київ : МОЗ України, 1999. 34 с.
18. ДБН В.2.2-15:2019. Житлові будинки. Основні положення. Київ : Мінрегіон України, 2019.
19. ДБН Б.2.2-12:2019. Планування та забудова територій. Київ : Мінрегіон України, 2019.
20. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. Київ : Мінрегіон України, 2018.
21. ДСТУ-Н Б В.2.2-27:2010. Настанова з розрахунку природного освітлення будинків і споруд. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010.
22. Meng Q., Evgrafova O., Li M. A Predictive Model for Traffic Noise Reduction Effects of Street Green Spaces with Variable Widths of Coniferous Vegetation. Forests. 2025. Vol. 16, № 2. Art. 238. DOI: https://doi.org/10.3390/f16020238.
23. ДСТУ Б В.2.6-23:2009. Конструкції будинків і споруд. Вікна та двері. Методи визначення звукоізоляції та класифікація за звукоізоляційними властивостями.

Дата першого надходження статті до видання: 24.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

УДК 581.543:712.4(477.85-25)
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.2

ФЕНОЛОГІЧНА МІНЛИВІСТЬ PRUNUS SERRULATA LINDL. ЯК ІНДИКАТОР СТАНУ ЗЕЛЕНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ (НА ПРИКЛАДІ М. ЧЕРНІВЦІ)

Зароченцева О.Д.[1] (orcid.org/0000-0002-2451-5223),
Тимчук К.Ю.[2] (orcid.org/0000-0001-5238-1544)
[1]Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича
вул. Коцюбинського, 2, 58012, м. Чернівці
[2]Буковинський державний медичний університет
пл. Театральна, 2, 58002, м. Чернівці
o.zarochentseva@chnu.edu.ua, katerynagavryliak@gmail.com

У статті досліджено фенологічну мінливість сортів *Prunus serrulata* Lindl. ‘Amanogawa’ та ‘Kanzan’ в умовах урболандшафту м. Чернівці з метою оцінки можливості їх використання як індикаторів стану зеленої інфраструктури урбанізованих територій. Фенологічний моніторинг проводили протягом 2023 та 2025 років відповідно до міжнародної шкали BBCH із визначенням строків проходження основних вегетативних і генеративних фенофаз, тривалості вегетаційного періоду, а також аналізом сум активних температур. Додатково здійснено оцінку температурного режиму досліджуваних років та його впливу на сезонний розвиток рослин. Встановлено міжрічну мінливість проходження фенологічних фаз, що проявлялася зміщенням початку вегетації, цвітіння та осінніх фенофаз на більш ранні календарні строки у 2025 році порівняно з 2023 роком. Тривалість вегетаційного періоду сорту ‘Amanogawa’ становила 227 діб у 2023 р. та 217 діб у 2025 р., сорту ‘Kanzan’ – 218 та 213 діб відповідно. Показано, що строки проходження основних фенологічних фаз визначалися насамперед накопиченням сум активних температур, а не календарними датами, що підтверджує високу чутливість досліджуваних сортів до сучасних кліматичних змін. Проведено порівняльну оцінку декоративних, морфологічних та екологічних особливостей сортів і визначено їх перспективність для використання у складі дендрофлори міської зеленої інфраструктури. Встановлено, що сорт ‘Kanzan’ завдяки широкій кроні є більш придатним для озеленення паркових і алейних насаджень, тоді як сорт ‘Amanogawa’ доцільно використовувати у вуличних насадженнях та на територіях з обмеженим простором завдяки компактній колоновидній формі крони. Водночас обидва сорти характеризуються відносно невисокою кормовою цінністю для комах-запилювачів, що необхідно враховувати при формуванні функціонально збалансованої зеленої інфраструктури міст. Отримані результати підтверджують доцільність використання фенологічних характеристик *Prunus serrulata* як чутливого індикатора реакції деревних рослин на кліматичні зміни та можуть бути використані для оптимізації асортименту деревних видів під час планування, реконструкції й управління зеленими насадженнями урбанізованих територій. *Ключові слова:* зелена інфраструктура, дендрофлора, Prunus serrulata, фенологічний моніторинг, урболандшафт, суми активних температур, кліматичні зміни, Чернівці.

Phenological Variability of *Prunus serrulata* Lindl. as an Indicator of Green Infrastructure Condition in Urban Areas (A Case Study of Chernivtsi, Ukraine). Zarochentseva O., Tymchuk K.

The study investigates the phenological variability of *Prunus serrulata* Lindl. cultivars ‘Amanogawa’ and ‘Kanzan’ in the urban landscape of Chernivtsi, Ukraine, to evaluate their potential as indicators of the condition of urban green infrastructure. Phenological monitoring was conducted in 2023 and 2025 according to the international BBCH scale by recording the timing of the main vegetative and reproductive phenophases, the duration of the vegetation period, and the accumulation of growing degree days. In addition, thermal conditions during the study years and their influence on seasonal plant development were analysed. Interannual variability in phenological development was revealed, manifested by an earlier onset of vegetative growth, flowering, and autumn phenophases in 2025 compared with 2023. The vegetation period lasted 227 and 217 days for ‘Amanogawa’ and 218 and 213 days for ‘Kanzan’, respectively. The results demonstrated that the timing of the main phenological phases was primarily determined by the accumulation of growing degree days rather than calendar dates, confirming the high sensitivity of the studied cultivars to ongoing climate change. A comparative assessment of the ornamental, morphological, and ecological characteristics of both cultivars was performed, and their suitability for inclusion in the dendroflora of urban green infrastructure was evaluated. The cultivar ‘Kanzan’, characterised by a broad crown, is more suitable for park and avenue plantings, whereas ‘Amanogawa’, with its compact columnar crown, is recommended for street plantings and space-limited urban sites. At the same time, both cultivars exhibit relatively low value as forage resources for insect pollinators, which should be considered when developing functionally balanced urban green infrastructure. The obtained results confirm that the phenological characteristics of *Prunus serrulata* can serve as sensitive indicators of the response of urban woody vegetation to climate change and may be applied in the selection of tree species for the planning, reconstruction, and sustainable management of urban green infrastructure. *Key words:* green infrastructure, dendroflora, Prunus serrulata, phenological monitoring, urban landscape, growing degree days, climate change, Chernivtsi.

© Зароченцева О.Д., Тимчук К.Ю., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. Стрімка урбанізація та глобальні кліматичні зміни формують нові виклики для управління зеленою інфраструктурою міст. За прогнозами ООН, до 2050 р. частка міського населення планети досягне 68%, що зумовлює зростання навантаження на міські екосистеми [1]. Збільшення площ міст відбувається переважно за рахунок трансформації природних ландшафтів у забудовані простори, що супроводжується погіршенням екологічних умов, зростанням теплових островів та деградацією природних екосистем. Міські зелені зони забезпечують широкий спектр екосистемних послуг [2], включно з підтриманням мікроклімату [3], збереженням біорізноманіття, підтриманням зв'язності ландшафту [4] та підвищенням стійкості урбоекосистем [5].

Актуальність дослідження. Фенологія деревних рослин є одним із найбільш чутливих індикаторів сучасних кліматичних змін та широко використовується для оцінювання трансформації міських екосистем. Особливу увагу дослідників привертають декоративні сакури (*Prunus serrulata* Lindl. та споріднені таксони), оскільки строки їхнього цвітіння швидко реагують на зміни температурного режиму й можуть використовуватись як індикатори стану зеленої інфраструктури урбанізованих територій [6]. Оцінка цих зрушень на прикладі модельних видів є необхідною основою для прийняття науково-обґрунтованих рішень у сфері озеленення міст.

Японська квітуча вишня (*Prunus serrulata* Lindl.) є одним із найпопулярніших декоративних деревних видів у міських насадженнях країн Європи та України [7, 8]. Завдяки вираженій чутливості цвітіння до температурних умов цей вид широко розглядається як біоіндикатор кліматичних змін [9; 10; 11].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження виконано у рамках наукової роботи кафедри екології та біомоніторингу Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича «Оцінка екосистемних послуг і асоційованих факторів ризику на градієнтах ландшафтних умов у цілях сталого розвитку» (№ держреєстрації: 0121U105597). Результати безпосередньо пов'язані з реалізацією Цілі 11 сталого розвитку ООН та відповідають вимогам ДБН Б.2.2-12:2018 «Планування і забудова територій» [12] в частині формування та управління зеленою інфраструктурою населених пунктів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Довготривалі фенологічні ряди спостережень, що ведуться в Японії протягом 1300 років, підтверджують суттєве зміщення строків цвітіння сакур до більш ранніх дат у відповідь на сучасне потепління [11; 13]. Allen та ін. прогнозують зміщення термінів цвітіння *P. serrulata* 'Kanzan' у Середньоатлантичному регіоні США приблизно на один місяць раніше до 2080 р. [9]. Разом із тим останні дослідження демонструють, що реакція сакур на зміну клімату є складнішою, ніж просте прискорення весняного розвитку. Встановлено, що строки початку цвітіння визначаються не лише швидкістю накопичення тепла навесні, але й достатнім проходженням періоду зимового охолодження, необхідного для виходу бруньок зі стану спокою. У регіонах із м'якими зимами недостатня кількість холодових годин може навіть затримувати початок цвітіння, незважаючи на загальне підвищення температури повітря [6; 14; 15].

Зростає кількість досліджень, присвячених використанню сучасних цифрових методів фенологічного моніторингу [16] та залучення до цього процесу громадськості [6]. Аналіз геоприв'язаних фотографій, матеріалів соціальних мереж та автоматизованих систем спостереження дає можливість детально відстежувати просторово-часову динаміку цвітіння сакур і формувати високоточні фенологічні карти міських насаджень. Такі підходи значно розширюють можливості моніторингу зеленої інфраструктури в умовах урбанізованого середовища.

Окремим напрямом сучасних досліджень є прогнозування адаптації *Prunus serrulata* до майбутніх кліматичних умов. За допомогою моделей розподілу видів встановлено, що зміни температурного режиму та режиму зволоження можуть спричинити зміщення потенційно придатних ареалів виду, що потребує врахування кліматичних сценаріїв при плануванні озеленення міст і доборі асортименту декоративних деревних рослин [8].

Для України дослідження фенології сакур лише набувають розвитку. Нещодавно проведені дослідження сортів *Prunus serrulata* 'Kanzan', 'Amanogawa', 'Royal Burgundy' та 'Kiku Shidare' у Правобережному Лісостепу України підтвердили їх високу декоративність, адаптивність до міських умов та виражену міжрічну мінливість сезонного розвитку, що свідчить про перспективність використання сакур у формуванні зеленої інфраструктури населених пунктів України [7; 17].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Попри суттєвий прогрес, недостатньо вивченими залишаються особливості фенологічної мінливості сакур у різних природно-кліматичних регіонах України, зокрема у Передкарпатті. Практично відсутні багаторічні порівняльні дослідження сортів 'Kanzan' та 'Amanogawa' в однакових умовах міського середовища, а також оцінювання зв'язку між накопиченням сум активних температур, строками проходження окремих фенологічних фаз і можливостями використання цих показників для оцінювання стану зеленої інфраструктури міст. Саме вирішенню цих питань присвячене дане дослідження.

Новизна. Вперше для умов м. Чернівці отримано порівняльний ряд фенологічних даних (2023/2025 рр.) для двох сортів *Prunus serrulata*

Lindl. і встановлено зв'язок між міжрічною мінливістю сум активних температур і зміщенням ключових фенологічних фаз. Обґрунтовано роль *P. serrulata* як модельного виду-індикатора стану зеленої інфраструктури міст Передкарпаття.

Матеріали та методи. Об'єктом дослідження слугували насадження *Prunus serrulata* Lindl. двох сортів у межах м. Чернівці (рис. 1). Перша дослідна ділянка – 25 дерев сакур сорту 'Amanogawa', висаджених у 2008 р. по периметру площі Філармонії (координати: 48.29470127398197, 25.93418395316833). Друга дослідна ділянка – лінійні насадження сакур сорту 'Kanzan' уздовж Парку культури та відпочинку ім. Т. Шевченка протяжністю 630 м (координати: 48.28226814375233, 25.939163943018716): 57 дерев, висаджених у 2010 та 2017 роках. Спостереження проводились у 2023 та 2025 рр.

Фенологічні спостереження здійснювались відповідно до протоколу Koch та ін. [18] з використанням розширеної шкали BBCH [19], адаптованої для кісточкових культур [20]. Частота спостережень: щодня у критичні фази, 1 раз на 3–5–7–10 діб поза ними. Метеорологічні дані (добові значення температури повітря та кількості опадів) надано Навчально-науковою геофізичною обсерваторією ЧНУ (2023, 2025 рр.).

Сума активних температур – це сума температур, що є вищими за біологічний мінімум за розрахунковий період, визначається за формулою 2.1:

$$\sum t_{акт} = t_{сер} \times n$$

$\Sigma\, t_{акт}$ – сума активних температур повітря за розрахунковий період, °С; $t_{сер}$ – активна температура повітря середня за розрахунковий період, °С; n – кількість днів у розрахунковому періоді.

Сума ефективних температур – це значення активних температур, зменшене на величину біологічного мінімуму за розрахунковий період (декаду, або місяць, або рік) визначається за формулою 2.2:

$$\sum t_{акт} = (t_{сер} - B) \times n$$

$\Sigma\, t_{еф}$ – сума ефективних температур повітря за розрахунковий період, °С; $t_{сер}$ – середня активна температура повітря за розрахунковий період, °С; B – біологічний мінімум, °С; n – кількість днів у розрахунковому періоді.

Для розрахунку загальної суми активних та ефективних температур за визначений період (декаду, місяць, рік) дані показники накопичуються [21].

Виклад основного матеріалу. Аналіз динаміки температури приземного шару повітря у м. Чернівці в 2023 та 2025 рр. показав перевищення багато-

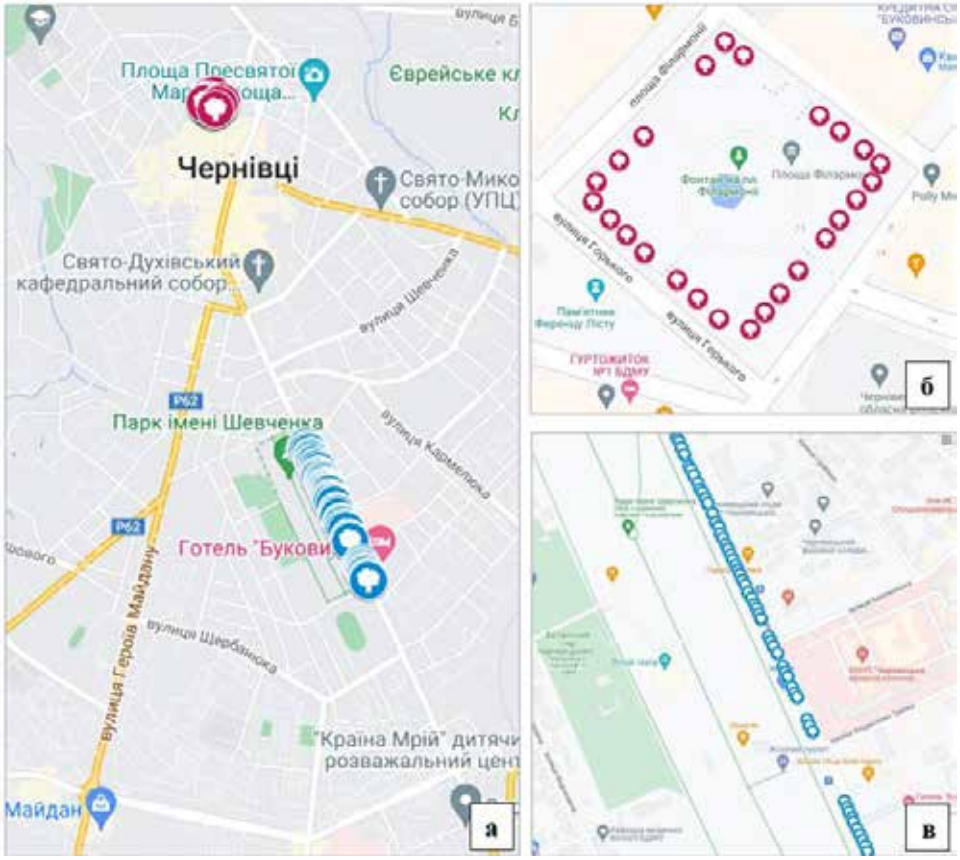


Рис. 1. Картосхема дослідних ділянок на карті м. Чернівці (а) та розміщення дерев сакури на площі Філармонії (б) та вздовж парку імені Тараса Шевченка (в) (створено з використанням сервісу «Мої карти» на Google maps)

річної кліматологічної норми останнього сторіччя (1923-2023 рр.) (рис. 2).

Середньомісячна температура повітря у 2023 році в більшості місяців перевищувала кліматологічну норму для м. Чернівці. Винятком став квітень, який характеризувався нижчими температурними показниками. Особливо холодною була перша декада місяця, коли середня температура становила лише 4,2 °С, а середньомісячна температура квітня дорівнювала 8,0 °С. Крім того, 5–6 квітня спостерігалися опади у вигляді снігу, що є нетиповим явищем для цього періоду. Найхолоднішим місяцем року був лютий із середньою температурою 1,2 °С, тоді як найтеплішим – серпень, коли середньомісячна температура досягла 22,6 °С, що на 3,3 °С перевищувало кліматологічну норму, а максимальна температура року 35,8°С зафіксована 29 серпня. Середньорічна температура повітря у 2023 році становила 11,2 °С, що на 27,4% перевищувало середню температуру попередніх 100 років. Варто зазначити, що середньомісячна температура протягом усього року залишалася додатною, навіть у зимові місяці.

У 2025 році середньомісячна температура повітря також переважно перевищувала багаторічну кліматологічну норму (1923–2023 рр.). Від'ємні відхилення від норми спостерігалися лише у лютому та травні. Найхолоднішим місяцем року став лютий із середньомісячною температурою –2,5°С, що на 0,5°С нижче за кліматологічну норму. Найтеплішим місяцем був липень, коли середня температура становила 22,1°С, максимальна температура року зафіксована 7 липня 2025 року (36,1 °С). Середньорічна температура повітря у 2025 році дорівнювала 10,8°С, що на 0,4°С нижче, ніж у 2023 році, проте на 2,0°С перевищувало багаторічне середнє значення. Це узгоджується із сучасною тенденцією підвищення температурного фону, яка спостерігається як у регіоні, так і в глобальному масштабі.

Загалом температурні умови обох років характеризувалися переважанням позитивних температурних аномалій відносно багаторічної норми, що створювало сприятливі умови для накопичення сум активних і ефективних температур та могло впливати на строки проходження окремих фенологічних фаз *Prunus serrulata* Lindl. Саме ці міжрічні особливості температурного режиму враховано при подальшому аналізі сезонного розвитку досліджуваних рослин. Розрахунок температурних сум охарактеризував теплозабезпеченість вегетаційних сезонів (табл. 1). У 2023 р. сума активних температур за вегетаційний сезон склала 3815,9°С, ефективних – 2640,9°С. У 2025 р. ці показники становили 3785,4°С та 2510,4°С відповідно. Отримані значення підтверджують високий потенціал теплових ресурсів м. Чернівці для вирощування теплолюбних декоративних видів, зокрема сакур.

За результатами фенологічних спостережень встановлено, що в обидва роки досліджень сорт 'Amanogawa' розпочинав сезонний розвиток раніше, ніж 'Kanzan' (табл. 2).

У сорту 'Amanogawa' в 2023 році набухання бруньок розпочалося 26 березня, у 2025 році – 31 березня.

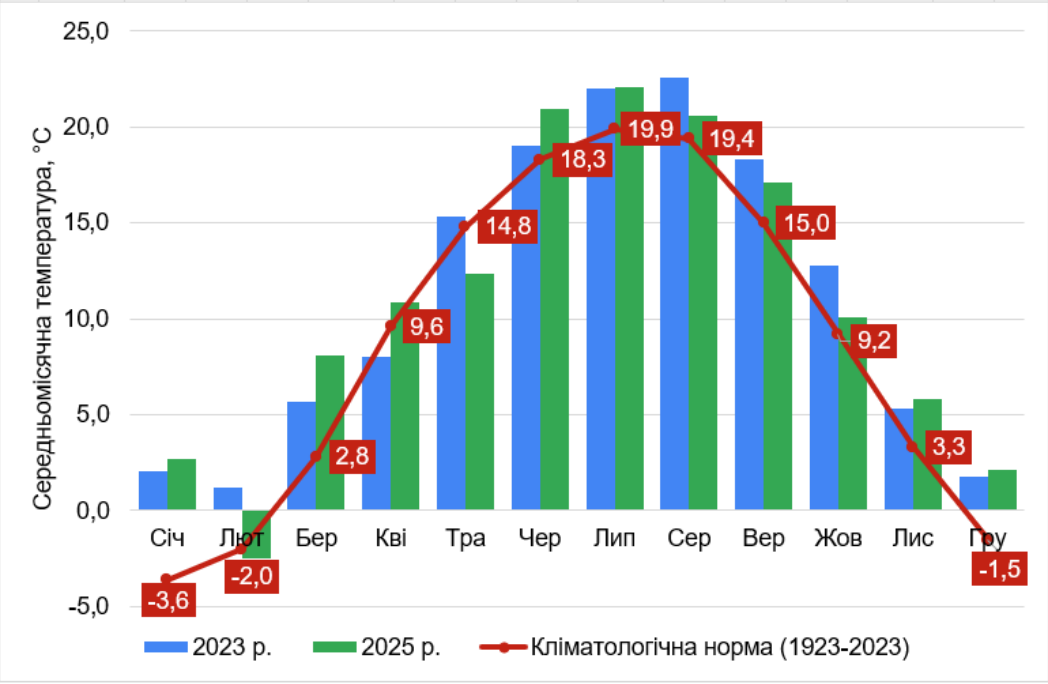


Рис. 2. Графік зміни середньомісячної температури приземного шару повітря м. Чернівці в 2023 та 2025 роках та кліматологічна норма за 1923-2023 рр. (https://climatecharts.net)

Таблиця 1

Суми активних та ефективних температур за вегетаційні сезони 2023 та 2025 рр. (м. Чернівці)

Показник	Сума накопичених активних темп. ($t_{акт}$ >5), °С у 2023 р.			Сума накопичених ефективних темп. ($t_{акт}$ >5), °С у 2023 р.			Сума накопичених активних темп. ($t_{акт}$ >5), °С у 2025 р.			Сума накопичених ефективних темп. ($t_{акт}$ >5), °С у 2025 р.		
Місяці / Декади	**1д.**	**2д.**	**1д.**	**2д.**	**3д.**	**1д.**	**2д.**	**3д.**	**3д.**	**1д.**	**2д.**	**3д.**
Січень												
Лютий												
Березень			92,4			37,4	71,3	148,0	251,2	21,3	48,0	96,2
Квітень		185,4	290,4		80,4	135,4		368,6	528,2		163,6	273,2
Травень	411,4	563,4	765,8	206,4	308,4	455,8	658,0	760,9	910,9	353,0	405,9	500,9
Червень	953,8	1125,8	1335,8	593,8	715,8	875,8	1136,6	1324,0	1538,2	676,6	814,0	978,2
Липень	1554,8	1783,8	2018,1	1044,8	1223,8	1403,1	1763,2	1968,5	2222,2	1153,2	1308,5	1507,2
Серпень	2233,1	2456,1	2717,9	1568,1	1741,1	1947,9	2436,3	2650,0	2860,8	1671,3	1835,0	1990,8
Вересень	2900,9	3086,9	3267,9	2080,9	2216,9	2342,9	3072,1	3245,4	3373,5	2152,1	2275,4	2353,5
Жовтень	3392,9	3498,9	3663,9	2417,9	2473,9	2588,9	3454,7	3540,7	3647,4	2384,7	2420,7	2472,4
Листопад	3763,9	3815,9		2638,9	2640,9		3729,4	3785,4		2504,4	2510,4	
Грудень												
Всього за період	**3815,9**			**2640,9**			**3685,4**			**2510,4**		

Таблиця 2

Фенологічні зміни *Prunus serrulata* Lindl. сортів ‘Kanzan’ та ‘Amanogawa’ і терміни їх настання (м. Чернівці, 2023 та 2025 рр.)

Опис фенологічних змін	Сакура сорту ‘Amanogawa’		Сакура сорту ‘Kanzan’	
	2023 р.	**2025 р.**	**2023 р.**	**2025 р.**
Вегетативні та генеративні бруньки в стані спокою	до 03.03.2023	10.03.2025	до 15.03.2023	10.03.2025
Набухання бруньок	26.03.2023	31.03.2025	06.04.2023	28.03.2025
Розпукування бруньок	14.04.2023	12.04.2025	18.04.2023	07.04.2025
Розпускання бруньок:	22.04.2023	18.04.2025	26.04.2023	17.04.2025
Цвітіння	29.04.2023	22.04.2025	02.05.2023	25.04.2025
Завершення цвітіння / всихання пелюсток	06.05.2023	27.04.2025	10.05.2023	01.05.2025
Відцвітання, опадання пелюсток	08.05.2023	01.05.2025	15.05.2023	04.05.2025
Зав’язування плодів:	15.05.2023	10.05.2025	–	–
Формування плодів	–	19.06.2025	–	–
Дозрівання плодів	–	21.07.2025	–	–
Завершення формування листя та пагонів	20.06.2023	01.07.2025	14.06.2023	19.06.2025
Перші зміни забарвлення листя	20.10.2023	13.10.2025	20.10.2023	13.10.2025
Повна зміна забарвлення листя / опадання листя	21.11.2023	29.10.2025	30.10.2023	24.10.2025
100% листя опало	26.11.2023	14.11.2025	21.11.2023	05.11.2025
Тривалість вегетації, діб	**227**	**217**	**218**	**213**

Водночас подальші весняні фази у 2025 році проходили раніше: початок розпускання бруньок зафіксовано 12 квітня проти 14 квітня у 2023 році, а розпускання квіткових бруньок – 18 квітня проти 22 квітня відповідно. Цвітіння у 2025 році також настало раніше і тривало з 22 до 27 квітня, тоді як у 2023 році – з 29 квітня до 6 травня. Отже, у 2025 році початок цвітіння змістився на сім діб раніше, а його тривалість скоротилася. Відмінності спостерігалися і в генеративному розвитку: у 2023 році після зав’я-

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

зування плодів 15 травня вони опали до кінця місяця, не досягнувши стадії достигання, тоді як у 2025 році зав'язування плодів відбулося 10 травня, їх формування тривало до 19 червня, а достигання, хоча й поодиноких плодів зафіксовано 21 липня. Осінні фенофази у 2025 році також настали раніше: зміна забарвлення листків розпочалася 13 жовтня, тоді як у 2023 році 20 жовтня, а повне опадання листя завершилося 14 листопада у 2025 році та 26 листопада у 2023 році. Таким чином тривалість вегетаційного циклу з 226 днів у 2023 році скоротилася до 216 днів у 2025 році.

У сорту 'Kanzan' відмінності між роками були ще виразнішими на початкових етапах сезонного розвитку. У 2023 році набухання бруньок розпочалося 6 квітня, тоді як у 2025 році – 28 березня. Початок їх розпускання змістився з 18 квітня у 2023 році на 7 квітня у 2025 році, а розпускання квіткових і листкових бруньок – з 26 квітня на 17 квітня. Цвітіння у 2025 році тривало з 25 квітня до 1 травня, тобто розпочалося на сім діб раніше, ніж у 2023 році, коли його зафіксовано в період з 2 до 10 травня. Осіннє забарвлення листків у 2025 році почалося 13 жовтня, на сім діб раніше, ніж у 2023 році, а повне опадання листя завершилося 5 листопада проти 21 листопада. Тривалість вегетаційного періоду становила 218 діб у 2023 році та 213 діб у 2025 році.

На основі даних дворічних фенологічних спостережень за сакурами сортів 'Amanogawa' та 'Kanzan' у м. Чернівці побудовано фенологічні спектри сезонного розвитку за 2023 та 2025 рр. (рис. 3). Отримані результати добре узгоджуються з дослідженнями Струтинської зі співавторами, які також відзначають більш ранній початок сезонного розвитку сорту 'Amanogawa' порівняно з 'Kanzan' та незначні відмінності у тривалості їхнього вегетаційного періоду [17]. Незважаючи на те, що встановлена в нашому дослідженні тривалість вегетації виявилася дещо більшою (213–226 діб проти 209–212 діб), загальна послідовність проходження фенологічних фаз і міжсортові особливості розвитку є подібними. Виявлені відмінності, ймовірно, пов'язані з кліматичними особливостями району досліджень, температурним режимом окремих років спостережень, а також природною міжрічною мінливістю фенологічних процесів.

Сучасні дослідження підтверджують перспективність використання різних сортів *Prunus serrulata* у формуванні зеленої інфраструктури міст, оскільки різноманітність архітектоніки крон і декоративних ознак дозволяє добирати їх відповідно до функціонального призначення та просторових особливостей території [7; 17].

Сорт 'Kanzan' характеризується широкою лійкоподібною кроною, що забезпечує більшу площу затінення та сприяє покращенню мікрокліматичних умов у паркових і алейних насадженнях. Натомість 'Amanogawa' має вузьку колоновидну крону шириною близько 1,5–2,5 м, завдяки чому є доцільним для використання на вузьких вулицях, у внутрішньоквартальних просторах та інших територіях з обмеженою площею озеленення [7; 17]. У проведеному дослідженні сорт 'Amanogawa' характеризувався довшим вегетаційним періодом порівняно з 'Kanzan', що потенційно забезпечує триваліший декоративний ефект міських насаджень.

Водночас обидва сорти мають обмежене значення як кормові рослини для комах-запилювачів. За даними літератури, декоративні форми сакур про-

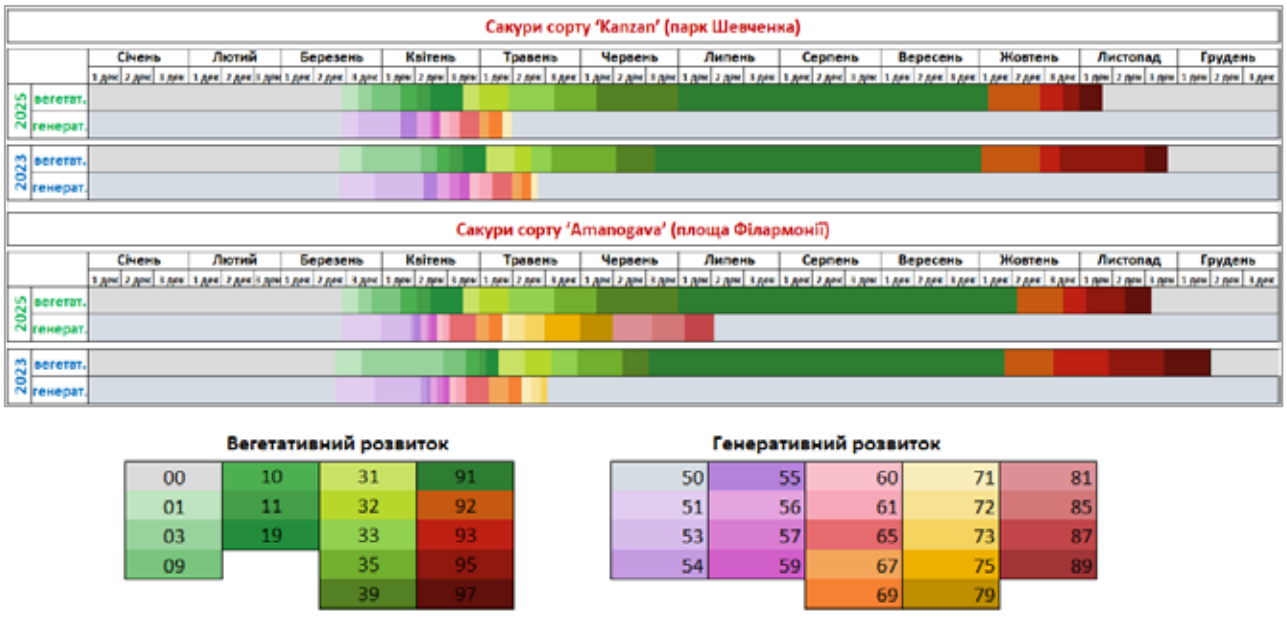


Рис. 3. Феноспектри вегетаційного циклу Prunus serrulata Lindl. сортів 'Kanzan' та 'Amanogawa' у м. Чернівці за 2023 та 2025 рр. (цифрове позначення фаз розвитку згідно Fadón et al., 2015 [20])

Таблиця 3

Порівняльна характеристика сортів 'Kanzan' та 'Amanogawa' *Prunus serrulata* Lindl. за критеріями придатності для зеленої інфраструктури

Критерій	'Amanogawa'	'Kanzan'
Форма крони	Колоновидна	Лійкоподібна
Висота / ширина крони, м	4–8 / 1,5–2,5	до 10 / 6–8
Тривалість вегетації 2023 / 2025 рр., діб	218 / 213	227 / 217
Терміни цвітіння 2023 / 2025 рр.	29.04–06.05 / 22.04–27.04	02.05–10.05 / 25.04–01.05
Осіннє забарвлення листя	Пурпурове, бордове, червоне	Жовто-оранжеве
Нектаро- та пилкопродуктивність	Незначна	Низька
Рекомендований тип насаджень	Вулиці, дворові простори обмеженого розміру	Паркові, алейні насадження

дукують порівняно невелику кількість нектару та пилку, тому їх відвідування запилювачами є значно нижчим, ніж у багатьох інших ентомофільних деревних видів [5; 22]. У зв'язку з цим при формуванні зеленої інфраструктури доцільно поєднувати декоративні сорти *Prunus serrulata* з місцевими деревними та трав`янистими видами, що характеризуються високою нектаро- та пилкопродуктивністю. Такий підхід сприятиме не лише підвищенню декоративної цінності міських насаджень, а й підтриманню біорізноманіття та екологічної стійкості урбанізованих екосистем [3; 5].

Висновки. Встановлено міжрічну мінливість сезонного розвитку сортів *Prunus serrulata* Lindl. в умовах м. Чернівці. Тривалість вегетаційного періоду сорту 'Amanogawa' становила 227 діб у 2023 р. та 217 діб у 2025 р., сорту 'Kanzan' – 218 та 213 діб відповідно. У 2025 році для обох сортів зафіксовано зміщення більшості весняних фенологічних фаз на більш ранні календарні строки та скорочення тривалості вегетаційного періоду, що свідчить про високу чутливість досліджуваних сортів до міжрічних коливань температурного режиму.

Встановлено, що строки проходження основних фенологічних фаз визначаються насамперед накопиченням активних температур, а не календарними датами. Сума активних температур у 2023 році становила 3815,9°C, у 2025 році – 3685,4°C, що відображає відмінності температурного режиму досліджуваних років. Отримані результати підтверджують можливість використання фенологічних характеристик *Prunus serrulata* Lindl. як чутливого індикатора змін температурного режиму та стану зеленої інфраструктури урбанізованих територій.

Обґрунтовано особливості використання досліджуваних сортів у формуванні зеленої інфраструктури міст. Сорт 'Kanzan' завдяки широкій кроні є доцільним для використання в паркових та алейних насадженнях, тоді як сорт 'Amanogawa' із вузькою колоновидною кроною є більш придатним для озеленення вулиць та інших ділянок з обмеженим простором. Водночас обидва сорти характеризуються відносно невисокою кормовою цінністю для комах-запилювачів, тому при формуванні міської зеленої інфраструктури їх доцільно поєднувати з видами, що забезпечують високу нектаро- та пилкопродуктивність і підтримують біорізноманіття урбанізованих екосистем.

Перспективи використання результатів дослідження. Накопичений ряд фенологічних даних є основою для формування системи фенологічного моніторингу зеленої інфраструктури м. Чернівці та інших міст України. Продовження спостережень дозволить отримати статистично значущий часовий ряд для моделювання фенологічних відповідей виду на кліматичні зміни та прогнозування оптимальних строків агротехнічних заходів. Методика може бути тиражована на інші декоративні деревні види при актуалізації нормативних документів у сфері озеленення [5, 12].

Література

1. World Population Prospects 2022: Summary of Results. United Nations, Department of Economic and Social Affairs. New York, 2022. URL: https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/wpp2022_summary_of_results.pdf
2. Liang D., Huang G. Influence of Urban Tree Traits on Their Ecosystem Services: A Literature Review. Land. 2023. Vol. 12(9). 1699. https://doi.org/10.3390/land12091699
3. Schwaab J., Meier R., Mussetti G. et al. The role of urban trees in reducing land surface temperatures in European cities. *Nature Communications*. 2021. Vol. 12. 6763. https://doi.org/10.1038/s41467-021-26768-w
4. Thaden J. V., Badillo-Montaño R., Lira-Noriega A. et al. Contributions of green spaces and isolated trees to landscape connectivity in an urban landscape. *Urban Forestry & Urban Greening.* 2021. Vol. 64. 127277. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127277
5. Maes J., Zulian G., Günther S. et al. Enhancing Resilience of Urban Ecosystems through Green Infrastructure. Final Report. European Union, Luxembourg, 2019. https://dx.doi.org/10.2760/689989

6. Maust A., Bradshaw M. J., Braun M., Kim S.-H., Tobin P. C. Citizen science data reveals winter warming delays cherry bloom in the Pacific Northwest, USA. *Plants, People, Planet*. 2025. Vol. 7(6). P. 1729–1738. https://doi.org/10.1002/ppp3.70037
7. Поліщук В. В., Ващук Ю. В., Бровді А. А., Козаченко І. В. Перспективи застосування різних форм та сортів сакури *Prunus serrulata* L. в моносадах. *Збірник наукових праць Уманського національного університету садівництва*. 2025. Вип. 106(1). С. 105–114. https://doi.org/10.32782/2415-8240-2025-106-1-105-114
8. He M., Wang J., Long C., Zou Z., Pan N., Huang L. Prediction of suitable areas for *Prunus serrulata* Lindl. in the context of future climate change. *Flora*. 2025. Vol. 331. Article 152827. https://doi.org/10.1016/j.flora.2025.152827
9. Allen J. M., Terres M. A., Katsuki T. et al. Modeling daily flowering probabilities: expected impact of climate change on Japanese cherry phenology. *Global Change Biology*. 2014. Vol. 20, No. 4. P. 1251–1263. https://doi.org/10.1111/gcb.12364
10. Jochner S., Menzel A., Estrella N. et al. Urban phenological studies – past, present, future. *Environmental Pollution.* 2015. Vol. 203. P. 250–261. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.01.003
11. Saitoh T. M. The significance of mining phenological data from the early 20th century: Insights from more than 100 years of cherry blossom phenology in Kumagaya, Japan // *Global Ecology and Conservation*. 2026. Vol. 66. Article e04104. DOI: https://doi.org/10.1016/j.gecco.2026.e04104
12. Про затвердження ДБН Б.2.2-12:2018 «Планування і забудова територій». Наказ Мінрегіону України від 26.04.2018 р. № 100. Київ, 2018. URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0100858-18#Text
13. Nagai S., Saitoh T. M., Morimoto H. Does global warming decrease the correlation between cherry blossom flowering date and latitude in Japan? *International Journal of Biometeorology*. 2020. Vol. 64(12). P. 2205–2210. https://doi.org/10.1007/s00484-020-02004-w
14. Hsu H.-W., Yun K., Kim S.-H. Variable warming effects on flowering phenology of cherry trees across a latitudinal gradient in Japan. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2023. Vol. 339. Art. 109571. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109571
15. Katsuki T., Kanetani S., Kedoin Y., Fujiwara T., Iketani H., Miller-Rushing A. J., Primack R. B. Impact of warmer winters on the flowering display of Tokyo cherry (*Cerasus* × *yedoensis* 'Somei-yoshino') at its southern range. *International Journal of Biometeorology*. 2026. Vol. 70, No. 4. Article 111. DOI: https://doi.org/10.1007/s00484-026-03185-6
16. ElQadi M. M., Dyer A. G., Vlasveld C., Dorin A. The spatiotemporal signature of cherry blossom flowering across Japan revealed via analysis of social network site images. *Flora*. 2023. Vol. 304. Article 152311. DOI: https://doi.org/10.1016/j.flora.2023.152311
17. Strutynska Y., Oleshko O., Lozinska T., Masalskyi V., Grabovskyi M., Polishchuk V., Balabak A., Kozachenko I. Biological, ecological and morphological features of sakura (*Prunus serrulata* L.) cultivation for further use in landscaping of Ukraine. *Scientific Papers. Series B, Horticulture*. 2025. Vol. LXIX(2). P. 709–719. https://horticulturejournal.usamv.ro/pdf/2025/issue_2/Art89.pdf
18. Koch E., Bruns E., Chmielewski F.-M. et al. Guidelines for Plant Phenological Observations. World Meteorological Organization. 2007. 16 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/266211199
19. Growth stages of mono- and dicotyledonous plants. BBCH Monograph / U. Meier (ed.). 2nd ed. Berlin: Julius Kühn-Institut (JKI), 2018. 204 p.
20. Fadón E., Herrero M., Rodrigo J. Flower development in sweet cherry framed in the BBCH scale. Scientia Horticulturae. 2015. Vol. 192. P. 141–147.
21. Жигайло О. Л., Костюкевич Т. К. Основи агрометеорології: методичні вказівки до практичної роботи «Визначення дат стійкого переходу температури повітря через різні пороги та підрахунок сум активних і ефективних температур». Одеса: ОДЕКУ, 2012. 26 с.
22. Strzałkowska-Abramek M. Nectar and pollen production in ornamental cultivars of Prunus serrulata (Rosaceae). *Folia Horticulturae*. 2019. Vol. 31(1). P. 205–212. http://dx.doi.org/10.2478/fhort-2019-0015

Дата першого надходження статті до видання: 20.07.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

УДК 581.524.3:712.253(477.60)
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.3

ТРАНСФОРМАЦІЯ ТАКСОНОМІЧНОЇ СТРУКТУРИ ПАРКОВОГО ДЕНДРОЦЕНОЗУ В ПРОМИСЛОВОМУ МІСТІ ПІВНІЧНОГО СТЕПУ УКРАЇНИ

Суслова О.П. (orcid.org/0000-0002-6371-7514),
Бойко Л.І. (orcid.org/0000-0002-1812-5114)
Криворізький ботанічний сад НАН України
вул. Ботанічна, 50, 50089, м. Кривий Ріг,
elenasuslova2901@gmail.com

Проведено порівняльний аналіз динаміки таксономічної структури паркового дендроценозу м. Покровськ, розташованого в північно-степовій зоні України, за 13-річний період (2011–2024 рр). Визначено видовий склад насаджень та представленість видів у парковому дендроценозі, розраховано математичні індекси видового різноманіття Шеннона й рівномірності Пієлу. Встановлено, що за 13-річний період асортимент деревних рослин у парку «Ювілейний» збільшився з 62 до 116 таксонів. Виявлено суттєві перебудови в систематичній структурі: частка представників відділу *Pinophyta* зросла з 11,0 % до 33,0 %, а *Magnoliophyta* відповідно зменшилася з 89,0 % до 67,0 %, що відбулося внаслідок інтродукції декоративних культиварів родини *Cupressaceae* (зростання з 0,8 % до 6,6 %). Зафіксовано зменшення часток основних автохтонних і провідних паркотвірних порід верхнього ярусу дендроценозу: *Oleaceae* (з 40,0 % до 37,0 %), *Fagaceae* (з 32,0 % до 29,0 %), *Fabaceae* (з 6,4 % до 5,0 %), *Salicaceae* (з 1,6 % до 0,5 %) та *Ulmaceae* (з 1,5 % до 0,7 %). Відзначено збільшення частки чагарників у 2,4 раза (з 5,2 % до 12,3 % від загальної чисельності рослин). З'ясовано, що сукупна частка основних видів-домінантів дендроценозу (*Fraxinus excelsior* L., *Quercus robur* L., *Picea pungens* Engelm., *Robinia pseudoacacia* L.) за 13-річний період знизилася з 78,2 % до 71,7 %. Визначено зростання частки інвазійного виду-трансформера *Acer negundo* L. на 5,0 %, що свідчить про синантропізацію та рудералізацію насадження. Розраховані таксономічні індекси (зростання індексу видового різноманіття Шеннона (з 2,50 до 2,67) та падіння індексу рівномірності Пієлу (з 0,613 до 0,565)) свідчать про розширення загального флористичного списку за збереження залежності насадження від ослаблених домінантів. Доведено, що перерозподіл у флористичному походженні видів у бік зростання частки представників Східноазіатської та Середземноморської областей з 7,4 % до 8,8 % відповідає сучасній концепції кліматоадаптивного озеленення. Практичне значення отриманих результатів полягає у формуванні наукового підґрунтя для стратегії адаптивного паркобудівництва в Степовій зоні України, яка передбачає цілеспрямовану та поетапну заміну деградуючих деревних порід на посухостійкі автохтонні та інтродуковані таксони. *Ключові слова:* видовий склад; паркове насадження; аридизація клімату; таксономічні індекси різноманіття; інвазійні види.

Transformation of the taxonomic structure of the park dendrocoenoses in the industrial city of the Northern Steppe of Ukraine. Suslova O., Boyko L.

A comparative analysis of the dynamics of the taxonomic structure of the park dendrocenosis of the city of Pokrovsk, located in the northern steppe zone of Ukraine, was conducted over a 13-year period (2011–2024). The species composition of the stands and the representation of species in the park dendrocenosis were determined, and the mathematical indices (Shannon species diversity one and Pielou evenness one) were calculated. It was ascertained that over a 13-year period, the range of woody plants in the park "Yuvileynyi" increased from 62 to 116 taxa. Significant restructuring in the systematic structure was revealed: the share of representatives of the *Pinophyta* division increased from 11.0% to 33.0%, and *Magnoliophyta*, respectively, decreased from 89.0% to 67.0%, which occurred as a result of the introduction of decorative cultivars of the *Cupressaceae* family (growth from 0.8% to 6.6%). A decrease in the shares of the main autochthonous and leading park-forming species of the upper tier of the dendrocenosis was recorded: *Oleaceae* (from 40.0% to 37.0%), *Fagaceae* (from 32.0% to 29.0%), *Fabaceae* (from 6.4% to 5.0%), *Salicaceae* (from 1.6% to 0.5%) and *Ulmaceae* (from 1.5% to 0.7%). An increase in the share of shrubs by 2.4 times (from 5.2% to 12.3% of the total number of plants) was noted. It was found that the total share of the main dominant species of the dendrocenosis (*Fraxinus excelsior* L., *Quercus robur* L., *Picea pungens* Engelm., *Robinia pseudoacacia* L.) decreased from 78.2% to 71.7% over the 13-year period. An increase in the proportion of the invasive transformant species *Acer negundo* L. by 5.0% was determined, which indicates synanthropization and ruderalization of the plantation. The calculated taxonomic indices (an increase in the Shannon species diversity index (from 2.50 to 2.67) and a decrease in the Pielou evenness index (from 0.613 to 0.565)) indicate an expansion of the general floristic list while maintaining the dependence of the stand on weakened dominants. It is proven that the redistribution in the floristic origin of species towards an increase in the share of representatives of the East Asian and Mediterranean regions from 7.4% to 8.8% corresponds to the modern concept of climate-adaptive landscaping. The practical significance of the results obtained lies in the formation of a scientific basis for a strategy of adaptive park construction in the steppe zone of Ukraine, which provides for a purposeful and phased replacement of degrading tree species with drought-resistant autochthonous and introduced taxa. *Key words:* species composition; park planting; climate aridization; taxonomic diversity indices; invasive species.

© Суслова О.П., Бойко Л.І., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. В умовах Північного Степу України, що характеризуються жорстким гідротермічним режимом, дефіцитом зволоження та частими посухами, паркові дендроценози виконують не лише естетичну і рекреаційну, а й важливі середовищеформуючу, санітарно-гігієнічну та мікрокліматичну функції [11]. Сучасні кліматичні зміни створюють значний екологічний пресинг на міські екосистеми. Наслідком цього є трансформація таксономічної структури паркових насаджень, що супроводжується випадінням менш толерантних автохтонних видів та одночасною експансією інвазійних [25, 27, 41]. Визначення векторів і темпів такої трансформації є важливим для прогнозування стану міських парків.

Актуальність дослідження. Необхідність дослідження таксономічного складу парків зумовлена динамічними змінами в міському середовищі, спричиненими зростаючим антропогенним навантаженням та аридизацією клімату [1, 13]. Аналіз видового різноманіття штучних насаджень дає змогу комплексно оцінити їхню потенційну вразливість до фітопатогенів та ентомошкідників [2, 12, 19]. З огляду на це, моніторинг трансформації таксономічної структури урбодендроценозів є актуальним науково-практичним завданням. Отримані результати мають стати підґрунтям для розробки заходів зі структурно-функціональної оптимізації флористичного складу міських парків, формування стратегій сталого управління зеленим господарством і прогнозування стійкості насаджень до негативних чинників довкілля. Це дозволить підвищити їхню екологічну і рекреаційну цінність та забезпечить перехід до принципів кліматоадаптивного озеленення [21, 29, 40]. Необхідність оцінки сучасного таксономічного складу та обґрунтування адаптивного асортименту деревних рослин, здатних довгостроково функціонувати в умовах техногенезу, зумовлює актуальність цього дослідження.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими і практичними завданнями. Представлені результати є висновками в межах комплексної науково-дослідної роботи, що виконується у відділі інтродукції та акліматизації рослин Криворізького ботанічного саду НАН України за темою «Стійкість та адаптивна спроможність деревно-чагарникових рослин в умовах урбоекосистем Правобережного степового Придніпров'я у зв'язку з глобальними кліматичними змінами», державний номер реєстрації 0117U00082883.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Визначення трансформації дендрофлори під впливом антропогенних та техногенних чинників в урбанізованому середовищі є предметом уваги вітчизняних та закордонних науковців. D. J. Nowak із співавторами зазначають, що антропогенний тиск на паркові насадження в промислових конгломератах за умов кліматичних змін призводить до їхньої деградації [30]. Доведено, що скорочення кліматичних ніш автохтонних видів Європи (*Quercus robur* L., *Tilia cordata* Mill., *Fraxinus excelsior* L.) спричинає їхнє масове випадіння з паркових дендроценозів південних і східних регіонів [38]. Дослідження P. Pyšek та ін. підтверджують, що зелені насадження промислових міст є первинними осередками інвазійних процесів. Автори наголошують, що за умов суттєвого порушення екотопів аборигенні компоненти та вибагливі декоративні інтродуценти масово заміщуються агресивними чужорідними видами, що змінює таксономічну структуру ценозів [26]. Зокрема, у міжнародних дослідженнях за участю українських дендрологів спрогнозовано подальшу експансію *Robinia pseudoacacia* L. у Східній Європі, оскільки посухостійкі інвазійні види суттєво розширюють свої екологічні ніші в урбанізованих ландшафтах [22]. Проте, комплексні дослідження посухостійкості деревних порід та довговічності паркових дендроценозів в умовах аридизації клімату та просторового моделювання зміни ареалів чужорідних видів свідчать, що в Степовій та Лісостеповій зонах Східної Європи саме посухостійкі автохтони та неінвазивні інтродуценти формуватимуть основу паркових ценозів майбутнього [36, 33, 34]. В Україні наукові дослідження зосереджені на питаннях структурно-функціональної організації дендроценозів у специфічних умовах промислових регіонів Степової зони України, що відзначаються жорсткими лісорослинними умовами та високим рівнем техногенного навантаження. Зокрема, визначено життєздатність та адаптивний потенціал деревних рослин за умов техногенного забруднення [3, 9], проаналізовано таксономічну структуру дендрофлори міських парків Степу та Лісостепу [14–17, 20]. Встановлено, що ключовою сучасною тенденцією трансформації таксономічної структури паркових дендроценозів є активна адвентизація флори [32], яка супроводжується збідненням видового різноманіття аборигенної фракції. Дослідження І. В. Хом'яка [18] свідчать про витіснення менш стійких місцевих видів видами-трансформерами. За умов аридизації клімату це призводить до зниження довговічності більшості традиційних паркоутворювачів і вимагає перегляду асортименту деревних порід для перспективного озеленення. Питанням оптимізації та відновлення паркових ландшафтів Степової зони приділяють увагу ландшафтні архітектори та екологи [10]. Проте, як зазначають науковці, більшість праць мають описовий характер конкретних дендроценозів, тоді як комплексний порівняльний аналіз тривалої динаміки таксономічної структури паркових насаджень висвітлено недостатньо [7, 35]. Отже, визначення темпів трансформації таксономічних пропорцій (співвідношення родин, родів, видів) і ролі інвазійного компонента в довгостроковій перспективі для промислових міст Північного Степу України потребує поглибленого аналізу, що й зумовило вибір теми нашого дослідження.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Незважаючи на наявність праць, присвячених дендрофлорі урбанізованих територій Степової зони України, поза увагою дослідників залишається низка важливих питань. Зокрема, недостатньо вивченими є динаміка та спрямованість трансформації таксономічного складу, а також рівень інвазійної активності адвентивних видів деревних рослин у паркових насадженнях Північного Степу України в умовах сучасних кліматичних змін. Виходячи з цього, метою наших досліджень було виявлення закономірностей трансформації таксономічної структури паркового дендроценозу в умовах промислового міста Північного Степу України за аридизації клімату, обґрунтування наукових засад її оптимізації та збереження.

Наукова новизна. Проведено комплексну оцінку сучасного стану та змін таксономічної структури паркового дендроценозу промислового міста Північного Степу України в умовах аридизації клімату. Вперше виявлено особливості інвазійної активності адвентивних видів деревних рослин у складі паркових насаджень досліджуваного регіону, уточнено закономірності перебудови родинно-родових комплексів дендрофлори під дією кліматичних чинників.

Матеріали та методи досліджень. Об'єктом досліджень були деревні насадження міського парку «Ювілейний» м. Покровськ. Видову приналежність визначали за загальноприйнятими дендрологічними визначниками та зведеннями [4–6, 8]. Для комплексного аналізу та оцінювання трансформації структури паркового дендроценозу обчислювали загальноприйняті таксономічні індекси різноманіття:

Індекс видового різноманіття Шеннона-Вівера (*H'*) розраховували за формулою [37]:

$$H' = -\sum_{i=1}^{s} p_i \ln(p_i),$$

де *S* – загальна кількість видів;

i – окремий вид (від 1 до S);

p_i – відносна чисельність *i*-го виду. Параметр розраховували як частку чисельності особин *i*-го виду (n_i) від загальної чисельності особин в насадженні (N).

Індекс рівномірності Пієлу (*E*) відображає співвідношення фактично виміряного різноманіття Шеннона (*H'*) до максимально можливого різноманіття (H'_{max}) для даної кількості видів [31]:

$$E = \frac{H'}{H'max},$$

де *H'* – фактично виміряний індекс різноманіття Шеннона;

H'_{max} – максимально можливе різноманіття для дендроценозу, яке досягається за умови абсолютно рівномірного розподілу особин між усіма видами.

$$H'_{max} = ln(S),$$

де S – загальна кількість видів.

Індекс Сімпсона (*D*) розраховували як суму квадратів відносних чисельностей кожного виду [39]:

$$D = \sum_{i=1}^{S} p_i^2,$$

де *S* – загальна кількість видів;

p_i – відносна чисельність *i*-го виду (p_i^2 – квадрат відносної чисельності).

Статистичне оброблення, математичні розрахунки та первинний аналіз отриманих даних здійснювати за допомогою середовища Excel.

Викладення основного матеріалу. За підсумками інвентаризації дендрофлори міського парку Покровська, проведеної у 2024 році, в насадженні зафіксовано 116 таксонів деревних рослин (57 видів та 59 гібридів і культиварів). Порівняно з даними 2011 року, коли видовий склад нараховував 62 таксони (54 види та 8 гібридів і культиварів), асортимент збільшився майже удвічі. За 13-річний період у систематичній структурі насадження відбулися помітні структурні зміни: частка представників відділу *Pinophyta* зросла з 11% до 33%, тоді як частка *Magnoliophyta* відповідно зменшилася з 89% до 67% (табл. 1).

Таксономічний аналіз паркового дендроценозу 2011 року свідчить про домінування за кількістю родів родин *Rosaceae* Juss. (9 родів), *Oleaceae* Hoff. et Link (4), *Fabaceae* Lindl. (3), а також *Cupressaceae* Barting., *Salicaceae* Mirb. та *Pinaceae* Lindl. (по 2 роди). Інші родини містили по одному роду (табл. 2).

За родовим багатством переважали родини *Rosaceae* (9 родів), *Oleaceae* (4) та *Fabaceae* (3). Найбільшим видовим різноманіттям характеризувалися роди *Acer* L. (5 видів: *A. negundo* L., *A. platanoides* L., *A. pseudoplatanus* L., *A. saccharinum* L., *A. tataricum* L.), *Populus* L. (4 види: *P. bolleana* Lauche, *P. nigra* L., *P. pyramidalis* Spach, *P. simonii* Carrière), *Fraxinus* L. (3 види: *F. excelsior* L., *F. lanceolata* Borkh., *F. pennsylvanica* Marsh.), *Malus* L. (3 види: *M. domestica* Borkh., *M. praecox* (Pall.) Borkh., *M. sylvestris* (L.) Mill.).

Дослідження 2024 року виявили розширення таксономічної структури на 7 родів, 3 види та 51 культивар. Найбільш активне збагачення асортименту відбулося за рахунок інтродукції декоративних культиварів родини *Cupressaceae* Gray (насамперед родів *Juniperus* L. та *Thuja* L.), частка яких у насадженні зросла з 0,8% до 6,6%. Аналіз представленості родин у дендроценозі свідчить про появу нових для насадження представників *Berberidaceae* Juss. (1,3% від загальної кількості екземплярів), *Buxaceae* Dumort. (0,6%), *Ginkgoaceae* Engl. (0,04%), *Hydrangeaceae* Dumort. (0,4%) та *Platanaceae* Dumort. (0,3%). Водночас зафіксовано зростання частки родин

Таблиця 1

Видовой склад та трапляння видів деревних рослин у парку «Ювілейний» м. Покровськ

№ п/п	Вид/культивар	Кількість, шт	Трапляння, %	Кількість, шт	Трапляння, %
		2011 рік		2024 рік	
1	2	3		4	
	Pinophyta				
	Дерева				
1	*Larix decidua* Mill. ‘Pendula’	-	-	3	0,04
2	*Picea abies* (L.) H. Karst.	10	0,1	5	0,06
3	*Picea glauca* (Moench) Voss	3	0,04	1	0,01
4	*Picea glauca* (Moench) Voss ‘Conica’	-	-	10	0,10
5	*Picea pungens* Engelm.	174	2,3	192	2,30
6	*Picea pungens* Engelm. *f. argentea* (R.C. Rosenthal) Beissn.	87	1,1	80	1,00
7	*Pinus pallasiana* D. Don	8	0,1	7	0,10
8	*Pinus sylvestris* L.	3	0,04	2	0,02
9	*Pinus mugo* Turra ‘Winter Gold’	-	-	5	0,06
10	*Thuja occidentalis* L. ‘Smaragd’	-	-	20	0,24
11	*Thuja occidentalis* L. ‘Brabant’	-	-	45	0,6
12	*Thuja occidentalis* L. ‘Columna’	-	-	5	0,06
13	*Thuja occidentalis* L. ‘Spiralis’	-	-	3	0,04
	Кущі				
14	*Juniperus communis* L.	5	0,1	2	0,02
15	*Juniperus communis* L. ‘Hibernica’	-	-	7	0,10
16	*Juniperus communis* L. ‘Green Carpet’	-	-	15	0,18
17	*Juniperus communis* L. ‘Repanda’	-	-	12	0,15
18	*Juniperus communis* L. ‘Horstmann’	-	-	3	0,04
19	*Juniperus horizontalis* Moench ‘Blue Chip’	-	-	30	0,36
20	*Juniperus horizontalis* Moench ‘Wiltonii’	-	-	15	0,18
21	*Juniperus horizontalis* Moench ‘Andorra Compact’	-	-	45	0,60
22	*Juniperus horizontalis* Moench ‘Golden Carpet’	-	-	36	0,40
23	*Juniperus horizontalis* Moench ‘Prince of Wales’	-	-	18	0,20
24	*Juniperus ×media* van Melle ‘Mint Julep’	-	-	30	0,36
25	*Juniperus ×media* van Melle ‘Old Gold’	-	-	34	0,41
26	*Juniperus ×media* van Melle ‘King of Spring’	-	-	21	0,26
27	*Juniperus ×media* van Melle ‘Pfitzeriana Aurea’	-	-	17	0,21
28	*Juniperus ×media* van Melle ‘Mordigan Gold’	-	-	38	0,46
29	*Juniperus ×media* van Melle ‘Blue and Gold’	-	-	16	0,19
30	*Juniperus sabina* L. ‘Tamariscifolia’	50	0,65	35	0,40
31	*Juniperus squamata* Buch. -Ham. ex D. Don ‘Blue Carpet’	-	-	14	0,17
32	*Juniperus scopulorum* Sarg. ‘Blue Arrow’	-	-	12	0,15
33	*Juniperus virginiana* L. ‘Grey Owl’	-	-	8	0,10
34	*Thuja occidentalis* L. ‘Globosa’	-	-	25	0,30
35	*Thuja occidentalis* L. ‘Golden Globe’	-	-	5	0,06
36	*Thuja occidentalis* L. ‘Hoseri’	-	-	9	0,11
37	*Thuja occidentalis* L. ‘Rheingold’	-	-	5	0,06
38	*Thuja occidentalis* L. ‘Little Champion’	-	-	16	0,19
	Magnoliophyta				
	Дерева				
39	*Acer negundo* L.	143	1,87	150	1,82
40	*Acer platanoides* L.	90	1,18	84	1,02

Продовження табл. 1

1	2	3		4	
41	*Acer platanoides* L. 'Crimson King'	-	-	12	0,15
42	*Acer platanoides* L. 'Drummondii'	-	-	4	0,05
43	*Acer platanoides* L. 'Globosum'	-	-	28	0,34
44	*Acer pseudoplatanus* L.	73	1,00	67	0,81
45	*Acer saccharinum* L.	34	0,45	30	0,36
46	*Acer tataricum* L.	42	0,55	54	0,66
47	*Aesculus hippocastanum* L.	97	1,27	118	1,43
48	*Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle	14	0,18	10	0,12
49	*Armeniaca vulgaris* Lam.	3	0,04	5	0,06
50	*Betula pendula* Roth	75	1,00	66	0,80
51	*Betula pendula* Roth 'Youngii'	-	-	5	0,06
52	*Betula pubescens* Ehrh.	7	0,10	6	0,07
53	*Catalpa bignonioides* Walter	6	0,08	20	0,24
54	*Catalpa bignonioides* Walter 'Globosa'	-	-	15	0,18
55	*Crataegus sanguinea* Pall.	1	0,01	1	0,01
56	*Elaeagnus angustifolia* L.	3	0,04	10	0,12
57	*Fraxinus excelsior* L.	2801	36,68	2775	33,72
58	*Fraxinus excelsior* L. 'Aureopendula'	-	-	3	0,04
59	*Fraxinus lanceolata* Borkh.	86	1,13	83	1,01
60	*Fraxinus pennsylvanica* Marsh.	1	0,01	1	0,01
61	*Ginkgo biloba* L. 'Pendula'	-	-	3	0,04
62	*Gleditsia triacanthos* L.	10	0,13	1	0,01
63	*Gleditsia triacanthos f. inermis* (L.) Zabel	15	0,20	12	0,15
64	*Juglans regia* L.	7	0,10	2	0,02
65	*Malus ×purpurea* (Barbier) Rehder	12	0,16	9	0,11
66	*Malus domestica* Borkh.	41	0,54	53	0,64
67	*Malus praecox* (Pall.) Borkh.	4	0,05	2	0,02
68	*Malus sylvestris* (L.) Mill.	3	0,04	1	0,01
69	*Morus alba* L.	14	0,18	9	0,11
70	*Padellus mahaleb* (L.) Vass.	17	0,22	11	0,13
71	*Padus avium* Mill.	69	0,90	56	0,68
72	*Platanus ×acerifolia* (Aiton) Willd.	-	-	28	0,34
73	*Populus ×canadensis* Moench	9	0,12	2	0,02
74	*Populus bolleana* Lauche	32	0,42	14	0,17
75	*Populus nigra* L.	17	0,22	3	0,04
76	*Populus pyramidalis* Spach	10	0,10	6	0,07
77	*Populus simonii* Carrière	36	0,47	14	0,17
78	*Prunus serrulata* Thunb.	-	-	14	0,17
79	*Prunus divaricata* Ledeb.	7	0,09	2	0,02
80	*Prunus ×domestica* L.	18	0,24	7	0,09
81	*Pyrus communis* L.	24	0,31	16	0,19
82	*Quercus robur* L.	2400	31,43	2391	29,05
83	*Robinia pseudoacacia* L.	450	5,89	392	4,76
84	*Robinia pseudoacacia* L. 'Umbraculifera'	8	0,10	3	0,04
85	*Salix alba* L.	15	0,20	1	0,01
86	*Sorbus aucuparia* L.	44	0,58	13	0,16
87	*Sorbus aucuparia* L. 'Pendula'	-	-	7	0,09
88	*Sorbus intermedia* (Ehrh.) Pers.	23	0,30	5	0,06

ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

Закінчення табл. 1

1	2	3		4	
89	*Tilia cordata* Mill.	46	0,60	35	0,43
90	*Tilia platyphyllos* Scop.	40	0,52	34	0,41
91	*Ulmus minor* Mill.	39	0,51	16	0,19
92	*Ulmus laevis* Pall.	16	0,21	3	0,04
93	*Ulmus parvifolia* Jacq.	28	0,37	16	0,19
94	*Ulmus glabra* Huds.	28	0,37	26	0,32
	Кущі				
95	*Berberis vulgaris* L. ‘Atropurpurea’	-	-	20	0,24
96	*Berberis thunbergii* DC. ‘Golden Ring’	-	-	12	0,15
97	*Berberis thunbergii* DC. ‘Green Carpet’	-	-	30	0,36
98	*Berberis thunbergii* DC. ‘Red Pillar’	-	-	30	0,36
99	*Berberis thunbergii* DC. ‘Admiration’	-	-	16	0,19
100	*Buxus sempervirens* L.	-	-	50	0,61
101	*Caragana arborescens* Lam.	23	0,30	20	0,24
102	*Cerasus vulgaris* Mill.	9	0,12	8	0,10
103	*Cotoneaster horizontalis* Decne.	-	-	10	0,12
104	*Cornus mas* L.	31	0,41	10	0,12
105	*Forsythia europaea* Degen & Bald.	60	0,79	42	0,51
106	*Ligustrum vulgare* L.	105	1,37	105	1,28
107	*Philadelphus coronarius* L.	51	0,67	45	0,55
108	*Hydrangea arborescens* L. ‘Annabelle’	-	-	18	0,22
109	*Hydrangea paniculata* Siebold ‘Vanille Fraise’	-	-	12	0,15
110	*Physocarpus opulifolius* L. Maxim. ‘Diabolo’	-	-	21	0,26
111	*Physocarpus opulifolius* L. Maxim. ‘Luteus’	-	-	20	0,24
112	*Syringa vulgaris* L.	17	0,22	10	0,10
113	*Spiraea ×cinerea* Zabel	-	-	9	0,11
114	*Spiraea japonica* L. ‘Gold Flame’	-	-	37	0,45
115	*Spiraea japonica* L. ‘Little Princess’	-	-	29	0,35
116	*Spiraea ×vanhouttei* (Briot) Zabel	43	0,56	76	0,92
	Всього	7637	100	8230	100

Bignoniaceae Juss. (з 0,1% до 0,4%), *Rosaceae* (з 4,2% до 4,8%), *Hippocastanaceae* DC. (з 1,3% до 1,4%) та *Elaeagnaceae* Juss. (з 0,04% до 0,1%). Однак, спостерігається чітка тенденція до зменшення участі основних паркотвірних едифікаторів верхнього ярусу. За 13 років частка представників родини *Oleaceae* зменшилася з 40,0% до 37,0%, *Fagaceae* Dumort. – з 32,0% до 29,0%, *Fabaceae* – з 6,4% до 5,0%, *Salicaceae* Mirb. – з 1,6% до 0,5%, *Ulmaceae* Mirb. – з 1,5% до 0,7%.

Аналіз географічного походження показує збереження домінуючої ролі видів Циркумбореальної флористичної області, відображуючи значну частку автохтонних видів (табл. 3). Другу позицію утримує Атлантично-Північноамериканська область (8 видів), але при збереженні кількості видів, частка її участі зменшилася з 14,8% до 14,0%. Поповнення видового складу на три види відбулося за рахунок інтродуцентів із Середземноморської та Східноазіатської областей, які характеризуються високою декоративністю та кліматичною адаптивністю.

Основу паркового дендроценозу формують п’ять домінантних видів: *Acer negundo*, *Fraxinus excelsior*, *Quercus robur*, *Picea pungens* Engelm. та *Robinia pseudoacacia.* У 2011 році їхня сукупна частка становила 78,2%, а у 2024 році – 71,7%. Чисельність *Quercus robur* та *Fraxinus excelsior* залишалася відносно стабільною (втрата екземплярів становила відповідно 0,4% та 0,1% від вихідної кількості), що відповідає фоновому природному відпаду та санітарному вилученню дерев із насадження. Зменшення частки *Robinia pseudoacacia* на 12,9% вказує на помірне випадіння виду з насадження та може бути зумовлено природним старінням й проведенням санітарних рубок сухостійних і аварійних екземплярів.

Суттєву трансформацію видового складу демонструє зростання часток *Acer negundo* (на 5,0%) та

Таблиця 2

Порівняльна характеристика систематичної структури паркового дендроценозу м. Покровськ (2011–2024 рр)

Родина	2011 рік			2024 рік		
	роди	види	гібриди/ культи-вари	роди	види	гібриди/ культи-вари
	штук					
Aceraceae Juss.	1	5	0	1	5	3
Berberidaceae Juss.	0	0	0	1	0	5
Betulaceae Gray	1	2	0	1	2	1
Bignoniaceae Juss.	1	1	0	1	1	1
Buxaceae Dumort.	0	0	0	1	1	0
Cornaceae Dumort.	1	1	0	1	1	0
Cupressaceae Gray	2	1	1	2	1	28
Elaeagnaceae Juss.	1	1	0	1	1	0
Fabaceae Lindl.	3	3	2	3	3	2
Fagaceae Dumort.	1	1	0	1	1	0
Ginkgoaceae Engl.	0	0	0	1	0	1
Hippocastanaceae DC.	1	1	0	1	1	0
Hydrangeaceae Dumort.	1	1	0	2	2	2
Juglandaceae DC. ex Perleb	1	1	0	1	1	0
Moraceae Gaudich.	1	1	0	1	1	0
Oleaceae Hoffmanns. & Link	4	6	0	4	6	1
Pinaceae Spreng. ex Rudolphi	2	5	1	3	5	4
Platanaceae Dumort.	0	0	0	1	0	1
Rosaceae Juss.	9	12	3	10	14	9
Salicaceae Mirb.	2	5	1	2	5	1
Simaroubaceae DC.	1	1	0	1	1	0
Tiliaceae Juss.	1	2	0	1	2	0
Ulmaceae Mirb.	1	4	0	1	4	0
Всього	35	54	8	42	57	59

Таблиця 3

Походження видів деревних рослин в паркових насадженнях м. Покровськ

№ п/п	Походження видів (флористична область за А. Л. Тахтаджяном)	Види			
		2011 рік		2024 рік	
		шт	%	шт.	%
1	Атлантично-Північноамериканська	8	14,8	8	14,0
2	Циркумбореальна	27	50,0	28	49,1
3	Ірано-Туранська	5	9,3	5	8,8
4	Область Скелястих гір	1	1,9	1	1,8
5	Середземноморська	4	7,4	5	8,8
6	Східноазіатська	4	7,4	5	8,8
7	2 і більше областей	5	9,3	5	8,8

Picea pungens (на 10,3%) (рис.). Експансія інвазійного виду *Acer negundo* з високою екологічною пластичністю та активним самосівом є маркером синантропізації та рудералізації дендроценозу. Створюючи значний конкурентний тиск, він поступово витісняє менш конкурентоспроможні та більш цінні аборигенні породи [23]. Збільшення частки *Picea pungens* свідчить про цілеспрямований штучний добір під час реконструкції та декоративного озеленення парку, що підвищує естетичність насадження впродовж всього року, однак зумовлює необхідність моніторингу життєздатності особин

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

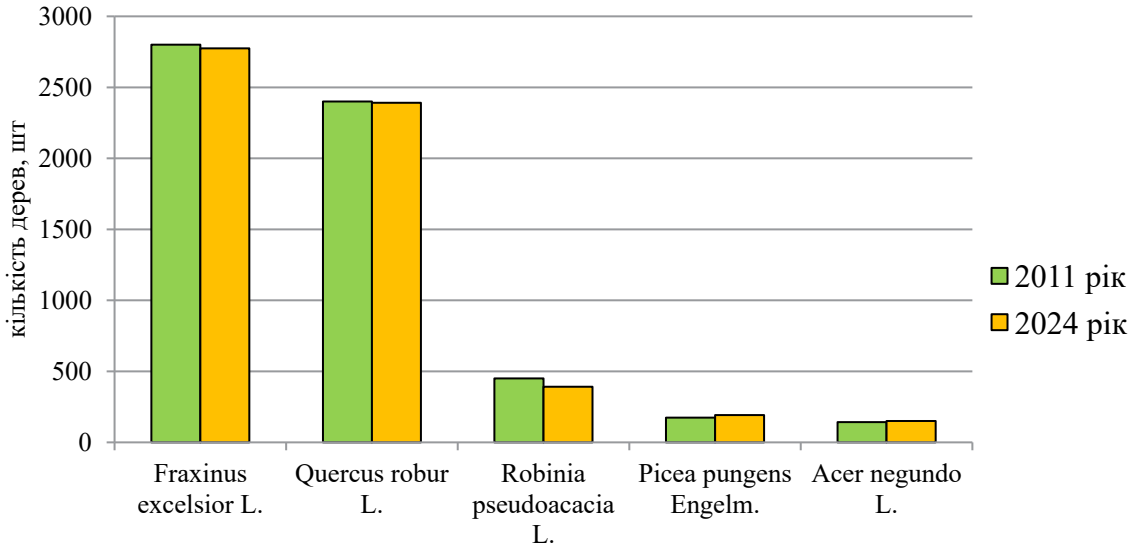


Рис. Динаміка чисельності паркотвірних видів за роки дослідження (%)

в умовах кліматичних змін. Більшість інших видів трапляються значно рідше, їхня частка у насадженні не перевищує 1,0–1,9%, або вони представлені поодинокими екземплярами (*Picea glauca* (Moench) Voss, *Armeniaca vulgaris* Lam., *Crataegus sanguinea* Pall., *Fraxinus pennsylvanica*, *Malus sylvestris* тощо).

За 13-річний період суттєво змінилася ярусна структура насадження: частка кущів зросла у 2,4 рази – з 5,2% в 2011 році до 12,3% в 2024 році. Збільшення їхньої частки зумовлено залученням посухостійких та декоративних культиварів *Juniperus communis* L., *J. horizontalis* Moench, *Thuja occidentalis* L., *Berberis thunbergii* DC., *Physocarpus opulifolius* (L.) Maxim. тощо.

Для об'єктивної оцінки трансформації таксономічної структури дендроценозу розраховано математичні індекси різноманіття (табл. 4). Зростання індексу Шеннона з 2,50 в 2011 році до 2,67 в 2024 році свідчить про збільшення видового багатства. Проте одночасне зниження індексу рівномірності Пієлу з 0,613 до 0,565 та високі показники домінування вказують на формування диспропорції: штучне насичення дендроценозу поодинокими екземплярами культиварів підвищує загальний флористичний список, але основу парку надалі формують декілька старіючих домінантів – *Fraxinus excelsior* та *Quercus robur*, які становлять майже 64% від усіх досліджуваних дерев. Аналогічні процеси штучного збагачення парків декоративними культиварами та інтродуцентами відзначають D. J. Nowak із співавторами [28], підкреслюючи, що в умовах щільної міської забудови видове багатство зростає першочергово за рахунок ландшафтного дизайну, а не природного відновлення. Водночас виявлена спрямованість до зменшення в насадженні частки провідних автохтонних видів-домінантів (*Fraxinus excelsior* на 3,2%, *Quercus robur* – 2,6%) узгоджується з загальноєвропейськими прогнозами. Як свідчать дослідження P. Dyderski та A. Paź-Dyderska [24], в умовах аридизації клімату Східної та Центральної Європи мезофітні види (*Fraxinus excelsior*, *Tilia cordata*, *Quercus robur*) зазнають значного гідротермічного стресу, що призводить до відмирання крони, зниження конкурентоспроможності та поступового випадіння з ярусу домінантів. У північно-степовій зоні України цей процес значно прискорюється через високий рівень техногенного забруднення довкілля, що підтверджується працями І. І. Коршикова та ін. [9].

Важливим аспектом трансформації таксономічної структури є динаміка потенційно інвазійних та адвентивних видів. Наші дані свідчать про відносну стабільність або навіть незначне зменшення частки

Таблиця 4

Таксономічні індекси міського паркового дендроценозу в м. Покровськ

Індекс	2011 рік	2024 рік
Кількість видів (S)	59	113
Індекс Шеннона (H')	2,50	2,67
Індекс рівномірності Пієлу (E)	0,613	0,565
Індекс Сімпсона (D)	0,1706	0,1450

Robinia pseudoacacia (з 5,89 % до 4,76 %) та утримання частки *Acer negundo* на рівні 1,82–1,87 % у парковому дендроценозі за умов регулярного комунального догляду та викошування підліску. Це дещо відрізняється від спостережень Л. В. Зав'ялової [32], яка фіксує стрімку адвентизацію та витіснення аборигенних видів видами-трансформерами у занедбаних або напівприродних парках Степової зони. Як підкреслюють P. Pyšek із співавторами [26], а також R. Puchałka та ін. [22], за відсутності належного фітосанітарного контролю та в умовах посилення посух інвазійні ксерофіти мають високий потенціал до освоєння екологічних ніш деградуючих аборигенних порід.

Таким чином, порівняльний аналіз доводить, що трансформація таксономічної структури паркового дендроценозу м. Покровськ безпосередньо відображає загальностепові тенденції деградації вразливих деревних порід під впливом аридизації та потребує цілеспрямованої корекції шляхом залучення посухостійких, кліматоадаптивних інтродуцентів.

Отримані результати досліджень є основою для прийняття науково обґрунтованих рішень у галузі міського озеленення. В контексті адаптивного паркобудівництва проведений моніторинг дозволяє розробити рекомендації щодо поступової заміни деградуючих та вимогливих до вологи видів на більш посухостійкі та екологічно пластичні автохтонні та інтродуковані таксони.

Головні висновки:

1. Виявлено зменшення часток основних автохтонних і провідних паркотвірних порід верхнього ярусу дендроценозу: *Oleaceae* (з 40,0 % до 37,0 %), *Fagaceae* (з 32,0 % до 29,0 %), *Fabaceae* (з 6,4 % до 5,0 %), *Salicaceae* (з 1,6 % до 0,5 %) та *Ulmaceae* (з 1,5 % до 0,7 %). Зафіксовано збільшення частки чагарників у 2,4 раза (з 5,2 % до 12,3 % від загальної чисельності рослин). Це свідчить про початок деструкції верхнього ярусу насадження та загрозу спрощення його просторової структури.

2. З'ясовано, що сукупна частка основних видів-домінантів дендроценозу *(Fraxinus excelsior*, *Quercus robur*, *Picea pungens*, *Robinia pseudoacacia*) за 13-річний період знизилася з 78,2 % до 71,7 %. Зростання частки інвазійного виду-трансформера *Acer negundo* на 5,0 % свідчить про синантропізацію та рудералізацію насадження.

3. Визначено, що зростання індексу видового різноманіття Шеннона (з 2,50 до 2,67) та падіння індексу рівномірності Пієлу (з 0,613 до 0,565) свідчить про розширення загального флористичного списку за збереження залежності насадження від ослаблених домінантів.

4. Доведено, що перерозподіл у флористичному походженні видів у бік зростання частки представників Східноазіатської та Середземноморської областей з 7,4 % до 8,8 % відповідає сучасній концепції кліматоадаптивного озеленення. Практичне значення отриманих результатів полягає у формуванні наукового підґрунтя для довгострокової стратегії адаптивного паркобудівництва в Степовій зоні України, яка передбачає цілеспрямовану та поетапну заміну деградуючих деревних порід на посухостійкі й екологічно пластичні автохтонні та інтродуковані таксони.

Література

1. Аналіз складу та показники видового різноманіття дендрофлори Ватутінського міського парку та дендропарку ім. Т. Г. Шевченка м. Звенигородка / А. В. Коджебаш та ін. *Науковий вісник НЛТУ України.* 2024. Вип. 34 (5). С. 9–15. DOI: https://doi.org/10.36930/40340501
2. Бойко Т. О. Фітосанітарний стан зелених насаджень м. Херсон. *Науковий вісник НЛТУ України.* 2020. Вип. 30 (4). С. 67–72. DOI: https://doi.org/10.36930/40300412
3. Бойко Л. І., Юхіменко Ю. С., Данильчук О. В. Інтродукція деревних рослин у промисловому регіоні Степової зони України та їх використання в озелененні міст : монографія. Київ : Талком, 2024. 268 с.
4. Дендрофлора України. Дикорослі й культивовані дерева і кущі. Голонасінні : довідник / М. А. Кохно та ін. Київ : Вища школа, 2001. 207 с.
5. Дендрофлора України. Дикорослі й культивовані дерева і кущі. Покритонасінні : довідник / М. А. Кохно та ін. Київ : Фітосоціоцентр, 2002. Ч. 1. 447 с.
6. Дендрофлора України. Дикорослі й культивовані дерева і кущі. Покритонасінні : довідник / М. А. Кохно та ін. Київ : Фітосоціоцентр, 2005. Ч. 2. 716 с.
7. Іванченко О. Е., Бессонова В. П. Видове різноманіття та естетична характеристика насаджень селищного парку (смт Іларіонове). *Питання степового лісознавства та лісової рекультивації земель*. 2020. Вип. 49. С. 26–47. DOI: https://doi.org/10.15421/442003
8. Калініченко О. А. Декоративна дендрологія : навч. посіб. Київ : Вища школа, 2003. 199 с.
9. Коршиков І. І., Суслова О. П., Петрушкевич Ю. М. Деревні рослини в умовах промислових міст Степу : монографія. Одеса : Гельветика, 2020. 456 с.
10. Кучерявий В. П. Ландшафтна архітектура : підручник. Львів : Новий Світ-2000, 2019. 519 с.
11. Кучерявий В. П. Урбоекологія : підручник. Львів : Новий Світ-2000, 2021. 460 с.
12. Лаптєв О. О. Інтродукція та акліматизація рослин з основами озеленення. Київ : Фітосоціоцентр, 2001. 128 с.
13. Міські парки як важливий компонент екологічної інфраструктури: збереження біорізноманіття та забезпечення рекреаційних можливостей / Р. М'ялковський та ін. *Український журнал лісівництва та деревинознавства.* 2023. Вип. 14 (4). С. 57–72. DOI: https://doi.org/10.31548/forest/4.2023.57

14. Пономарьова О. А., Бессонова В. П., Іванченко О. Є. Дендрофлора парку ім. Ю. Гагаріна у Дніпропетровську. *Науковий вісник НЛТУ України.* 2014. Вип. 24 (1). С. 63–69. URL: https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2014/24_1/63_Pon.pdf (дата звернення: 12.08.2026).
15. Суслова О. Посухостійкість деревних рослин в паркових насадженнях промислових міст степової зони України. *Екологічні науки*. 2025. Вип. 60 (3). С. 147–152. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.3-60.27
16. Суслова О. Аналіз гігроморфної структури дендроценозів промислових міст у контексті сучасних змін гідротермічного режиму степової зони України. *Екологічні науки.* 2026. Вип. 66 (3). С. 195-201. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.27
17. Суслова О. П., Бойко Л. І. Видовий склад, екологічна та просторова структури паркового дендроценозу промислового міста в степовій зоні України. *Екологічні науки.* 2023. Вип. 47 (2). С. 96–101. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.2-47.15
18. Хом'як І. В. Інвазії *Acer negundo* L. у порушені екосистеми гірничих об'єктів на території Українського Полісся. *Український журнал природничих наук.* 2025. Вип. 13. С. 421–429. DOI: https://doi.org/10.32782/naturaljournal.13.2025.40
19. Шепелюк М., Рибак Ю. Фітосанітарний стан зелених насаджень у міському озелененні Луцька. *Науковий вісник Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки. Серія: Біологічні науки.* 2019. Вип. 387 (3). С. 52–57. DOI: https://doi.org/10.29038/2617-4723-2019-387-52-58
20. Шепелюк М., Матвієнко О., Абасова О. Таксономічна структура дендрофлори парку аграрно-економічного коледжу Полтавської ДАА. *Біологія та екологія.* 2019. Вип. 5 (1). С. 25–33. DOI: https://doi.org/10.33989/2414-9810.2019.5.1.195112
21. Benefits of Urban Parks a systematic review / C. Konijnendijk et al. *A Report for IFPRA*. Copenhagen & Alnarp, Ifpra, University of Copenhagen. 2013. P. 24–31. URL: https://www.researchgate.net/publication/267330243_Benefits_of_Urban_Parks_A_systematic_review_-_A_Report_for_IFPRA (дата звернення: 12.08.2026)
22. Black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) range contraction and expansion in Europe under changing climate / R. Puchałka et al. *Global Change Biology.* 2021. Vol. 27 (8). P. 1587–1600. DOI: https://doi.org/10.1111/gcb.15486
23. Fanal A., Mahy G., Monty A. Can we foresee future maple invasions? A comparative study of performance-related traits and invasiveness of eight *Acer* species. *Plant Ecology.* 2022. Vol. 223 (10–12). P. 1–12. DOI: https://doi.org/ 10.1007/s11258-022-01266-1
24. How much does climate change threaten European forest tree species distributions? / M. Dyderski et al. *Global Change Biology.* 2018. Vol. 24. P. 1150–1163. DOI: https://doi.org/10.1111/gcb.13925
25. Leeuwen E., Van Nijkamp P., Noronha T. The Multiple Functions of Urban Green Space. *International Journal of Agricultural Sustainability*. 2010. Vol. 8 (1–2). P. 20–25. DOI: https://doi.org/10.3763/ijas.2009.0466
26. Naturalized alien flora of the world: species diversity, taxonomic and phylogenetic patterns, geographic distribution and global hotspots of plant invasion / P. Pyšek et al. *Preslia*. 2017. Vol. 89 (3). P. 203–274. DOI: https://doi.org/10.23855/preslia.2017.203
27. Nowak D., Crane D., Dwyer J. Compensatory value of urban trees in the United States. *Arboriculture & Urban Forestry.* 2002. Vol. 28 (4). P. 194–199. DOI: https://doi.org/10.48044/jauf.2002.028
28. Nowak D., Greenfield E. Tree and impervious cover change in U.S. cities. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2012. Vol. 11 (1). P. 21–30. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ufug.2011.11.005
29. Nowak D., Greenfield E. US Urban Forest Statistics, Values, and Projections. *Journal of Forestry.* 2018. Vol. 116. P. 164–177.DOI: https://doi.org/10.1093/jofore/fvx004
30. Nowak D., Greenfield E., Ellis A. Assessing Urban Forest Threats across the Conterminous United States. *Journal of Forestry.* 2022. Vol. 120 (6). P. 676–692. DOI: https://doi.org/10.1093/jofore/fvac019
31. Pielou E. C. The measurement of diversity in different types of biological collections. *Journal of Theoretical Biology.* 1966. Vol. 13. P. 131–144. DOI: https://doi.org/10.1016/0022-5193(66)90013-0
32. Plant invasions in Ukraine / L. Zavialova et al. *Environmental & Socio-economic Studies.* 2021. Vol. 9 (4). P. 1–13. DOI: https://doi.org/10.2478/environ-2021-0020
33. Predicted range shifts of alien tree species in Europe / R. Puchałka et al. *Agricultural and Forest Meteorology.* 2023. Vol. 341. P. 109650. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109650
34. Process based simulation of tree growth and ecosystem services of urban trees under present and future climate conditions / T. Rötzer et al. *Science of The Total Environment*. 2019. Vol. 676 (1). P. 651–664. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.235
35. Reshetiuk O. V. Comprehensive analysis of dendroflora in Schiller Park-Monument of Landscape Gardening in Chernivtsi. *Scientific Bulletin of UNFU.* 2023. Vol. 33 (5). P. 28–39. DOI: https://doi.org/10.36930/40330504
36. Resistance of urban trees to drought shaped by family and site in a semi-arid city / J. L. Molina-Pardo et al. *Urban Forestry & Urban Greening.* 2025. Vol. 114. P. 129167. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ufug.2025.129167
37. Shannon C., Weaver W. The Mathematical Theory of Communication. The University of Illinois Press, Urbana, 1949. 117 p. DOI: https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x
38. Shifts in native tree species distributions in Europe under climate change / M. Dyderski et al. *Journal of Environmental Management.* 2025. Vol. 373. 123504. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123504
39. Simpson E. H. Measurement of diversity. *Nature.* 1949. Vol. 163 (4148). P. 688. DOI: https://doi.org/10.1038/163688a0
40. Tauhid F. Urban green infrastructure for climate resilience: A Review. *Nature National Academic Journal of Architecture*. 2018. Vol. 5 (1). P. 58–65. DOI: https://doi.org/10.24252/nature.v5i1a7
41. Urban forests and climate change / L. Brasanac-Bosanac et al. *Sustainable Forestry Collection*. 2022. P. 1–12. DOI: https://doi.org/10.5937/SustFor2285001B

Дата першого надходження статті до видання: 16.07.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА

УДК 613.6
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.4

СУСПІЛЬНА АКТИВНІСТЬ МОЛОДІ З ПИТАНЬ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ В УМОВАХ ВОЄННИХ ДІЙ

Ващук В.В. (orcid.org/0000-0002-5344-3820),
Писаревська С.В. (orcid.org/0000-0003-4043-1692),
Яремко З.М. (orcid.org/0000-0001-8508-7763),
Тимошук С.В. (orcid.org/0000-0002-3124-0328),
Кіт Л.Я. (orcid.org/0000-0002-8645-1106),
Львівський національний університет імені Івана Франка
вул. Дорошенка 41, 79007, м. Львів
viktoriya.vashchuk@lnu.edu.ua, solomiya.pysarevska@lnu.edu.ua,
zinoviy.yaremko@lnu.edu.ua, svitlana.tymoshuk@lnu.edu.ua, lyubov.kit@lnu.edu.ua

Повномасштабна війна в Україні спричинила не тільки гуманітарні та соціально-економічні втрати, а й зумовила масштабну екологічну кризу, наслідки якої матимуть довготривалий і кумулятивний характер. Руйнування промислових підприємств, інфраструктури, об'єктів енергетики, пожежі, вибухи та використання боєприпасів призводять до інтенсивного забруднення атмосферного повітря, ґрунтів і водних ресурсів небезпечними хімічними речовинами. Значні території зазнають деградації, втрачають можливість безпечного використання та становлять потенційну загрозу для здоров'я населення, флори й фауни. Водночас екологічні наслідки війни часто залишаються поза суспільною увагою, оскільки не завжди мають миттєво відчутні прояви та сприймаються як другорядні порівняно з прямими людськими втратами.

У цьому контексті особливої актуальності набуває питання усвідомлення екологічних наслідків війни молоддю, яка формує майбутній інтелектуальний, професійний та громадянський потенціал держави. Саме рівень екологічної свідомості молодого покоління значною мірою визначатиме ефективність післявоєнного відновлення довкілля та впровадження сталих моделей розвитку. Метою статті є аналіз рівня усвідомлення студентською молоддю впливу військових дій на стан навколишнього середовища та здоров'я людини.

Дослідження базується на результатах анкетного опитування 320 студентів різної статі, віку та місця проживання. За результатами опитування проаналізовано суспільну активність молоді, її зацікавленість інформаційним простором, частоту отримання екологічної інформації, уявлення про основні джерела та наслідки забруднення довкілля в умовах війни, а також суб'єктивну оцінку впливу якості навколишнього середовища на стан здоров'я. Окремо розглянуто питання визначення найнебезпечніших чинників екологічного забруднення та усвідомлення молоддю ступеня впливу якості навколишнього середовища на здоров'я людей загалом.

Отримані результати засвідчують загалом високий рівень усвідомлення студентською молоддю значного впливу військових дій на довкілля та здоров'я людини. Водночас встановлено недостатню представленість екологічної проблематики в медійному просторі, що може стримувати формування глибшої екологічної свідомості. Запропоновані студентами напрями вирішення екологічних проблем підкреслюють важливість розвитку екологічної освіти, посилення моніторингу довкілля, залучення міжнародної допомоги та активної участі громадянського суспільства у процесах екологічного відновлення України.
Ключові слова: екологія, війна, усвідомлення небезпек, забруднення довкілля, небезпечні речовини, здоров'я.

Social activity of youth in issues of environmental safety in the conditions of military actions. Vashchuk V., Pysarevska S., Yaremko Z., Tymoshuk S., Kit L.

The full-scale war in Ukraine caused not only humanitarian and socio-economic losses, but also led to a large-scale ecological crisis, the consequences of which will have a long-term and cumulative nature. The destruction of industrial enterprises, infrastructure, energy facilities, fires, explosions, and the use of ammunition lead to intensive pollution of atmospheric air, soil, and water resources with dangerous chemical substances. Significant areas are degraded, lose the possibility of safe use and pose a potential threat to the health of the population, flora and fauna. At the same time, the environmental consequences of war often remain outside of public attention, as they do not always have immediately tangible manifestations and are perceived as secondary compared to direct human losses.

In this context, the issue of awareness of the ecological consequences of the war among young people, who form the future intellectual, professional and civil potential of the state, becomes especially relevant. It is the level of environmental awareness of the younger generation that will largely determine the effectiveness of post-war environmental restoration and the introduction of sustainable development models. The purpose of the article is to analyze the level of awareness among student youth of the impact of military operations on the state of the environment and human health.

© Ващук В.В., Писаревська С.В., Яремко З.М., Тимошук С.В., Кіт Л.Я., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

The study is based on the results of a questionnaire survey of 320 students of different genders, ages and places of residence. Based on the results of the survey, the social activity of young people, their interest in the information space, the frequency of obtaining environmental information, the perception of the main sources and consequences of environmental pollution in the conditions of war, as well as the subjective assessment of the impact of the quality of the environment on health were analyzed. The question of determining the most dangerous factors of environmental pollution and awareness of the degree of impact of environmental quality on people's health in general is considered separately.

The obtained results testify to a generally high level of awareness among student youth of the significant impact of military operations on the environment and human health. At the same time, insufficient representation of environmental issues in the media space has been established, which can inhibit the formation of deeper environmental awareness. The directions for solving environmental problems proposed by the students emphasize the importance of developing environmental education, strengthening environmental monitoring, attracting international aid, and active participation of civil society in the processes of ecological restoration of Ukraine. *Key words:* ecology, war, awareness, pollution, dangerous substances, health.

Актуальність проблеми. Повномасштабні воєнні дії на території України спричинили не лише масштабні гуманітарні та соціально-економічні втрати, але й глибоку екологічну кризу, наслідки якої матимуть довготривалий, кумулятивний і трансгенераційний характер. В умовах післявоєнного відновлення України особливого значення набуває формування екологічної свідомості суспільства, зокрема молодого покоління, яке визначатиме стратегічні напрями відбудови країни. Саме студентська молодь є соціально активною групою, здатною виступати ініціатором екологічних змін, впровадження принципів сталого розвитку та контролю за дотриманням екологічних стандартів. Додаткової актуальності дослідженню надає необхідність інтеграції України до європейського екологічного простору, виконання міжнародних зобов'язань у сфері охорони довкілля та забезпечення екологічної безпеки. Без належного рівня екологічної обізнаності молоді неможливе ефективне впровадження політик зеленої трансформації та післявоєнного сталого розвитку. Отже, дослідження рівня усвідомлення студентською молоддю екологічних наслідків воєнних дій є своєчасним і науково обґрунтованим, оскільки дозволяє визначити потенціал молодого покоління як суб'єкта екологічних змін та окреслити напрями удосконалення екологічної освіти й інформаційної політики держави.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За даними Держекоінспекції та Міністерства захисту довкілля України [1], станом на січень 2025 року, загальна сума збитків, завданих росією навколишньому середовищу, становить майже 6,3 трильйона гривень [2]. Допоки триватиме війна, ця сума тільки збільшуватиметься. Найбільших збитків зазнали земельні ресурси та атмосферне повітря, а саме – ₴1,34 трлн та ₴1,15 трлн відповідно. До того ж суттєвих збитків завдають лісові пожежі та горіння нафти із сукупною шкодою приблизно ₴1,04 трлн [10].

Військові дії спричиняють масові викиди шкідливих речовин у повітря. Горіння нафтопродуктів, вибухи та пожежі спричинили понад 88 млн тонн викидів. Зокрема, горіння нафти дало 13,4 млн тонн забруднювальних речовин [2]. Викиди шкідливих речовин в атмосферу перевищують рівні мирного часу в десятки разів. Це спричиняє загальне зниження якості повітря та хвороби дихальної системи [2]. Наслідки забруднення повітря можуть бути короткочасними і довготривалими. Хоча короткочасний вплив не є тривалими, але навіть це може призвести до захворювань органів дихання та серцево-судинної системи. А внаслідок тривалого впливу забрудненого повітря проблеми зі здоров'ям можуть посилюватись і призводити до смерті.

Однак, у результаті бойових дій забруднення зазнає не тільки повітря, а й значні площі територій забруднені токсичними речовинами та залишками боєприпасів, у водойми потрапляють забруднювальні речовини, що значно шкодить людям, флорі та фауні. Площа засмічених земель становить понад 25,2 млн м², а забруднених ґрунтів – понад 1,38 млн м² [3]. Забруднення ґрунтів має критичний вплив на аграрне виробництво та екосистеми. Без належного очищення майбутнє використання цих територій буде обмеженим.

Забруднювальними речовинами із негативним впливом на здоров'я вважають: тверді частинки мікронних розмірів (компонентами яких є мінеральний пил, сульфати, нітрати, важкі метали тощо), озон, монооксид вуглецю або чадний газ, діоксид азоту, діоксид сірки.

Внаслідок забруднення довкілля зростає кількість передчасних смертей. Захворювання, що можуть виникати як наслідок впливу забрудненого повітря: рак, серцево-судинні й респіраторні захворювання, цукровий діабет, когнітивні розлади, неврологічні захворювання. Для вагітних жінок це ще й підвищений ризик народження дитини з недостатньою вагою, а також передчасних пологів. Загалом, у світі 26 % смертей новонароджених дітей пов'язують із забрудненням повітря [4].

Дослідницька група Conflict and Environment Observatory (**CEOBS**) у співпраці з Zoï Environment Network опублікувала огляд екологічних наслідків російської війни в Україні, порівнюючи екологічну ситуацію в країні до та після повномасштабного вторгнення. До лютого 2022 року основними екологічними проблемами України були типові для індустріальної країни забруднення та нестача води, побутові та промислові відходи, якість повітря [8].

За даними Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України, станом на квітень

2024 року в Україні утворилося всього 223237,3 тонн відходів від руйнувань [9].

Забруднення навколишнього середовища є додатковим чинником, який негативно впливає і буде впливати на демографічну ситуацію в Україні. Так, війна в Україні поглиблює наявну демографічну кризу різноманітним впливом, зокрема і впливом на якість навколишнього середовища. Початок повномасштабної війни з Росією 2022 року зробив Україну лідером за темпами знелюднення у світі. Смертність в Україні у 2025 році втричі більша за народжуваність. За даними Opendatabot, за весь 2025 рік народилося лише 168 778 дітей, тоді як зафіксовано 485 296 смертей [5, 11]. Зрозуміло, для зменшення впливу війни на довкілля мають здійснюватися надпотужні заходи з боку як держави, так і громадянського суспільства у співпраці із західними партнерами. Однак, треба розуміти, що в основі розв'язання будь-якої проблеми завжди лежить її усвідомлення, що і визначило мету цього дослідження.

В нашому попередньому дослідженні [7] студенти вважають, що інформування населення щодо екологічних наслідків війни є недостатнім. Тому ефективну систему моніторингу стану довкілля, яка б дозволила зафіксувати фактичний обсяг завданої шкоди довкіллю, важливо доповнити підвищенням рівня усвідомлення населенням реального екологічного стану з метою запровадження найефективніших заходів, щоб уникнути подальшого погіршення ситуації та відновлення екосистем до безпечного стану як для людини, так і для дикої природи.

Мета дослідження. Метою дослідження є комплексний аналіз рівня екологічної обізнаності та суспільної активності студентської молоді щодо наслідків воєнних дій для стану довкілля і здоров'я населення, а також визначення особливостей сприйняття молоддю екологічних ризиків та її готовності до участі у процесах післявоєнного екологічного відновлення України. В цьому дослідженні ми хотіли проаналізувати суспільну активність молоді, її зацікавленість інформаційним простором, частоту отримання екологічної інформації.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для аналізу усвідомлення студентською молоддю впливу воєнних дій на довкілля, нами було проведено опитування 320 осіб. Гендерний поділ: 80 % – особи жіночої статі, 20 % – особи чоловічої статі. З них віком до 18 років –73 %, з 18 до 23 років – 27 %. Основна частина студентів – 84 %, проживає у західному регіоні України у міській місцевості, близько 20 % проживають у сільській місцевості.

З метою виявлення усвідомлення студентами екологічних наслідків війни в Україні, студентам було запропоновано відповісти на наступні запитання:

1. Як часто Ви цікавитесь новинами?
2. Які новини найбільше привертають Вашу увагу?
3. Як Ви оцінюєте ступінь впливу забруднення довкілля на здоров'я людини?
4. Як Ви оцінюєте вплив воєнних дій на стан повітря?
5. Якими, на Вашу думку, є найсерйозніші аспекти забруднення довкілля?
6. Якими, на Вашу думку, є найнебезпечніші джерела забруднення довкілля під час воєнних дій?
7. Чи відчуваєте Ви вплив забруднення повітря на своє здоров'я?
8. Як, на Вашу думку, громадські організації можуть допомогти у вирішенні екологічних проблем, спричинених війною?
9. Які пропозиції щодо вирішення екологічних проблем в Україні Ви можете запропонувати?

Відповіді на перше запитання мало на меті виявити загальну суспільну активність молоді, тобто який є рівень участі молоді у функціонуванні суспільства та вирішенні актуальних проблем. Результати свідчать, що в середньому 42 % молоді часто, або постійно слідкують за новинами. Для осіб чоловічої статі (52 % від загальної кількості цих респондентів) це характерніше, ніж для осіб жіночої статі (40 % від загальної кількості цих респондентів). До того ж жителі міст (46 %) є суспільно активнішими, ніж ті, хто проживає у сільській місцевості (30 %).

Інший аспект опитування охоплював перелік тем, якими найбільше цікавляться студенти. Відповіді на це питання охоплювали теми, представлені на рис. 1. Результати свідчать, що найактуальніші проблеми існування українського суспільства також є в центрі уваги молоді, тому майже 80 % опитаних обох статей слідкують за новинами на фронті. До того ж, з рис. 1 видно, що ситуацією на фронті цікавляться як особи жіночої статі, так і особи чоловічої статі в рівних пропорціях. Пов'язаною з цією темою є тема щодо політичної ситуації в Україні, на яку звертають увагу приблизно 70 % осіб жіночої статі та 80 % осіб чоловічої статі. Культурні події є третьою темою, на яку звертають увагу як особи жіночої статі, так і особи чоловічої статі. Актуальні проблеми стану навколишнього середовища, на жаль, опинилися на останньому місці згідно результатів цього опитування. До того ж, є значна різниця в зацікавленості новинами щодо стану навколишнього середовища серед осіб чоловічої статі та осіб жіночої статі (16 % осіб чоловічої статі проти 51 % осіб жіночої статі).

З рис. 2 видно, що зацікавленість ситуацією на фронті не залежить від місцевості проживання. Проте зацікавленість станом навколишнього середовища, культурними подіями та політичною ситуацією є дещо більшою в осіб, які проживають у міській місцевості.

Усвідомлення проблем впливу забруднення довкілля залежить як від самосвідомості опитаних, так і від того як у суспільстві ці питання обговорюються, що в свою чергу впливає і на рівень усвідомлення суспільством. Тому логічним було зрозуміти

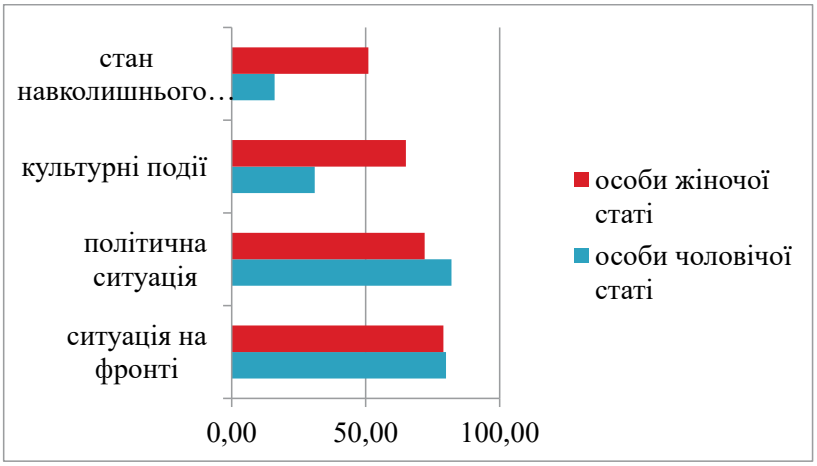


Рис. 1. Розподіл зацікавленістю типом новин за статтю, у відсотках

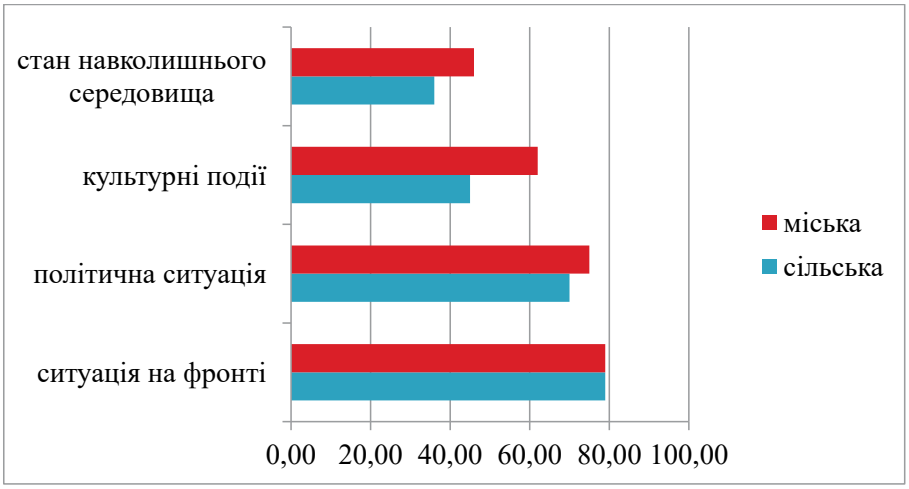


Рис. 2. Розподіл зацікавленістю типом новин за місцевістю проживання, у відсотках

як часто респонденти у засобах масової інформації, соціальних мережах стикаються з інформацією пов'язаною зі станом довкілля. Результати опитування свідчать про недостатню присутність екологічної тематики в інформаційному просторі, бо 4 % респондентів ніколи не зустрічали такі новини, тоді як 82 % – вказали, що стикалися з повідомленнями про стан довкілля – рідко, або іноді, решта 14 % – часто. Така ситуація може стримувати формування глибшого усвідомлення екологічних проблем у суспільстві, тому підвищення частоти та якості таких повідомлень у засобах масової інформації та соціальних мережах може стати важливим чинником у формуванні екологічної свідомості громадян.

Більшість респондентів (біля 71 %) вважає, що військові дії в Україні мають сильний вплив на стан довкілля. Найсерйознішими аспектами забруднення довкілля студенти вважають забруднення водних ресурсів – 92 %, забруднення повітря – 86 %, знищення лісів та рослинності – 77 % (рис. 3). Приблизні розрахунки вказують, що найбільших збитків зазнали земельні ресурси та атмосферне повітря, а саме – ₴1,19 трлн та ₴782,13 млрд відповідно. До того ж, ₴800 млрд збитків пов'язані з лісовими пожежами та горінням нафти [1]. Отже, більшість респондентів усвідомлює значний вплив військових дій на стан довкілля. Це частково співвідноситься з приблизними оцінками екологічних збитків. Таке усвідомлення є важливою передумовою для формування запиту на відновлення довкілля та впровадження ефективної екологічної політики в повоєнний період.

Найнебезпечнішими джерелами забруднення довкілля під час воєнних дій майже 90 % опитаних назвали викиди небезпечних хімічних речовин, а 75 % – пожежі на промислових об'єктах (рис. 4).

Важливо було дізнатися рівень усвідомлення молоддю ступеня впливу якості навколишнього середовища на здоров'я людей загалом. Респонденти оцінювали цей вплив за шкалою від 0 – немає впливу до 10 – сильно впливає. Отримані відповіді були у межах від 4 до 10 із середнім балом 8,2±0,5. Отже,

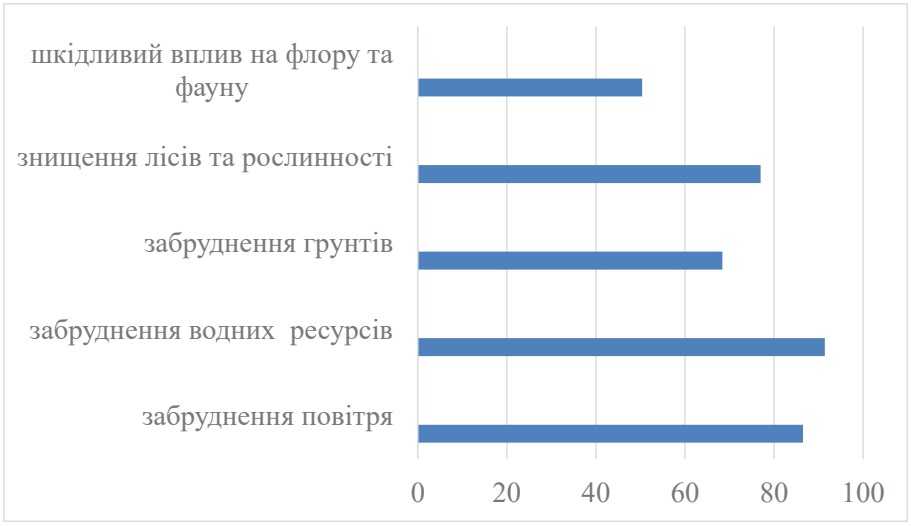


Рис. 3. Найсерйозніші аспекти забруднення довкілля (можна було обрати декілька варіантів), у відсотках



Рис. 4. Найнебезпечніші джерела забруднення довкілля під час воєнних дій (можна було обрати декілька варіантів), у відсотках

опитані вважають, що вплив стану навколишнього середовища є суттєвим, що добре корелює із даними праці [6]. Автор [6] зазначає, що забруднення природного середовища є кумулятивним чинником, що впливає на смертність населення, який є у рейтингу найнебезпечніших чинників для життя людини після таких чинників як нераціональне харчування, куріння тютюну та зловживання алкогольними напоями.

Щодо уже наявного впливу забруднення довкілля на здоров'я опитаних, маємо наступні результати: дуже сильно відчувають – 2 %, помірно відчувають – 43 % і не відчувають – 56 %. Це, очевидно, пов'язано з тим, що забруднення довкілля є кумулятивною небезпекою, тому наслідки ми можемо відчувати через тривалий проміжок часу.

Усвідомлення молоддю екологічних проблем, спричинених воєнними діями, дозволило сформувати актуальні пропозиції щодо їхнього вирішення в Україні. Серед них:

– масштабування у медійних засобах проблем забруднення довкілля;

– вдосконалення екологічної освіти у навчальних закладах усіх рівні освіти;

– посилення екологічного моніторингу;

– залучення міжнародної допомогу для відновлення забруднених територій;

– розвиток зеленої енергетики;

– розроблення комплексної програми екологічного відновлення з чіткими цілями та етапами.

Висновки. Таким чином, результати опитування підтверджують високий рівень екологічної обізнаності молоді та усвідомлення нею значного впливу стану навколишнього середовища на здоров'я людини, що узгоджується з науковими даними про його роль

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

як одного з ключових чинників ризику для життя в сучасних умовах. Пропозиції щодо вирішення цих проблем охоплюють, зокрема, підвищення обізнаності через соціальні мережі та освітні заходи, розвиток екологічних проєктів для відновлення природи після війни участь у волонтерських ініціативах (посадка дерев, очищення територій) та збір даних про екологічні злочини для міжнародних організацій.

Література

1. Завдані збитки у розрізі категорій впливу на довкілля. *Екозагроза. Офіційний ресурс Міністерства захисту довкілля:* веб-сайт. URL: https://ecozagroza.gov.ua/ (дата звернення: 12.05.2026).
2. Завдані збитки. Атмосферне повітря. *Екозагроза. Офіційний ресурс Міністерства захисту довкілля:* веб-сайт. URL: https://ecozagroza.gov.ua/damage/air (дата звернення: 12.05.2026).
3. Завдані збитки. Земельні ресурси. *Екозагроза. Офіційний ресурс Міністерства захисту довкілля:* веб-сайт. URL: https://ecozagroza.gov.ua/damage/shove (дата звернення: 12.05.2026).
4. Вплив воєнних дій унаслідок повномасштабного вторгнення росії на довкілля України. *Накипіло. Освіта:* веб-сайт. URL: https://osvita.nakypilo.ua/yak-viyna-vplyvaye-na-dovkillya-ukrayiny/ (дата звернення: 17.05.2026).
5. Демографічна криза в Україні: смертність б'є світові рекорди, а народжуваність стрімко падає. *ТСН. Україна:* веб-сайт. URL: https://tsn.ua/ukrayina/demografichna-kriza-v-ukrayini-smertnist-b-ye-svitovi-rekordi-a-narodzhuvanist-strimko-padaye-2719692.html. (дата звернення: 19.05.2026).
6. Stanaway J. D., et al. Global, regional, and national comparative risk assessment of 84 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks for 195 countries and territories, 1990–2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017: *The Lancet*. 2018. Vol. 392, № 10159. P. 1923–1994.
7. Ващук В. В., Писаревська С. В., Яремко З. М. Усвідомлення молоддю екологічних наслідків війни рф проти України. *Проблеми хімії та сталого розвитку*. 2024. № 1. с. 32-37.
8. Овчінніков О. Екологічні наслідки війни Росії в Україні. Огляд за березень 2024 року. *UWEC*: веб-сайт. URL: https://uwecworkgroup.info/uk/environmental-consequences-of-russias-war-in-ukraine-review-march-2024 (дата звернення: 19.05.2026).
9. Стан поводження з відходами від руйнувань в Україні станом на квітень 2024 року. *Екологія, Право, Людина*: веб-сайт. URL: https://epl.org.ua/announces/stan-povodzhennya-z-vidhodamy-vid-rujnuvan-v-ukrayini-stanom-na-kviten-2024-roku (дата звернення: 12.05.2026).
10. Стефанишин Н. Як вторгнення росії впливає на довкілля України та що ми можемо зробити для відновлення. *Освіта. Накипіло:* веб-сайт. URL: https://osvita.nakypilo.ua/yak-viyna-vplyvaye-na-dovkillya-ukrayiny (дата звернення: 23.05.2026).
11. Народжуваність та смертність. *Опендатабот:* веб-сайт. URL: https://opendatabot.ua/analytics/birth-death-2025-12 (дата звернення: 05.06.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 21.07.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

УДК 630*28:504.06:355.01
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.5

АНАЛІЗ ТРАНСФОРМАЦІЇ ЯКОСТІ НЕДЕРЕВНОЇ ПРОДУКЦІЇ ЛІСУ ПІД ВПЛИВОМ СУЧАСНИХ БЕЗПЕКОВИХ ВИКЛИКІВ

Врадій О.І. (orcid.org/0000-0001-7383-3829)
Вінницький національний аграрний університет
вул. Сонячна, 3, 21008, м. Вінниця
oksanavradii@gmail.com

Військові дії та безпекові виклики завдають непоправної шкоди лісовим екосистемам України, провокуючи пірогенну деструкцію ґрунтового покриву та локальне воєнно-техногенне забруднення. Дослідження міграції екотоксикантів у системі «ґрунт – рослина/гриб» є критично важливим для гарантування екологічної безпеки та збереження якості недеревної продукції лісу, що використовується населенням та фармацевтичною галуззю. Емпіричні дослідження проводили протягом 2024–2026 рр. на базі лісових масивів Вінницької області (зокрема, Гніванського та Калинівського лісництв). Вміст важких металів (Pb, Cd) у зразках ґрунту та біомаси визначали методом атомно-абсорбційної спектрометрії, питома активність ^{90}Sr вимірювалася радіометричним методом. Оцінку вегетаційного стану лісостанів здійснювали на основі супутникових знімків Sentinel-2 за індексом NDVI.

Установлено, що пірогенно-мілітарний вплив призводить до підкислення ґрунтів (pH знижується до 5,1 ± 0,3), підвищуючи рухливість токсикантів: вміст мобільного Pb у ґрунті зріс у 7 разів, Cd – у 8,4 раза, а активність ^{90}Sr – у 5,6 раза порівняно з контролем. Виявлено вибірковий характер акумуляції забруднювачів: максимальний вміст кадмію зафіксовано у *Boletus edulis* (1,85 мг/кг), а радіостронцію – у *Cantharellus cibarius* (112 Бк/кг, Кн = 1,65) та кальцієфілі *Urtica dioica L.* (Кн = 1,46). Виявлено стійкий зворотний кореляційний зв'язок між індексом NDVI та концентрацією екотоксикантів у ґрунті (r = -0,65 для ^{90}Sr та r = -0,72 для Pb).

Оцінено трансформацію якості недеревних лісових ресурсів у зонах мілітарного навантаження Лісостепу Правобережгного. Запропоновано предиктивну модель виявлення зон екологічного ризику на основі супутникового моніторингу NDVI. Обґрунтовано необхідність обов'язкового токсикологічного і радіометричного скринінгу недеревної продукції в радіусі до 5 км від місць техногенних інцидентів. *Ключові слова:* недеревна продукція лісу, важкі метали, безпекові виклики, радіоекологія.

Transformation of non-wood forest product quality under the influence of security challenges in conditions of technogenic and military impacts. Vradii O.

Military actions and security challenges cause irreparable damage to forest ecosystems of Ukraine, provoking pyrogenic destruction of soil cover and local military-technological pollution. Research on the migration of ecotoxicants in the «soil – plant / fungus» system is critically important for ensuring environmental safety and preserving the quality of non-timber forest products used by the population and the pharmaceutical industry. Empirical studies were conducted during 2024–2026 on the basis of forest areas of Vinnytsia region (in particular, Hnivan and Kalyniv forestry). The content of heavy metals (Pb, Cd) in soil and biomass samples was determined by atomic absorption spectrometry, the specific activity of ^{90}Sr was measured by radiometric method. The assessment of the vegetation state of forest stands was carried out based on Sentinel-2 satellite images using the NDVI index.

It was found that pyrogenic-military impact leads to acidification of soils (pH decreases to 5.1 ± 0.3), increasing the mobility of toxicants: the content of mobile Pb in the soil increased by 7 times, Cd – by 8.4 times, and the activity of ^{90}Sr – by 5.6 times compared to the control. The selective nature of the accumulation of pollutants was revealed: the maximum content of cadmium was recorded in *Boletus edulis* (1.85 mg/kg), and radiostrontium – in *Cantharellus cibarius* (112 Bq/kg, Ka = 1.65) and calciphiles *Urtica dioica L.* (Kn = 1.46). A stable inverse correlation was found between the NDVI index and the concentration of ecotoxicants in the soil (r = -0.65 for ^{90}Sr and r = -0.72 for Pb).

The transformation of the quality of non-timber forest resources in the zones of military load of the Right Bank Forest-Steppe is assessed. A predictive model for identifying ecological risk zones based on satellite monitoring of NDVI is proposed. The need for mandatory toxicological and radiometric screening of non-timber products within a radius of up to 5 km from the sites of technogenic incidents is substantiated. *Key words:* non-timber forest products, heavy metals, security challenges, radioecology.

Постановка проблеми. Лісові екосистеми України є важливою складовою природно-ресурсного потенціалу держави, виконуючи численні екологічні, економічні та соціальні функції. Вони забезпечують збереження біорізноманіття, підтримання кліматичної рівноваги, регулювання водного режиму територій, формування родючості ґрунтів та виступають джерелом цінних недеревних лісових ресурсів, серед яких особливе місце займають дикорослі ягоди та їстівні гриби. Останні не лише є важливими компонентами харчування населення, а й широко використовуються у фармацевтичній, харчовій та переробній промисловості [4].

Водночас у сучасних умовах лісові екосистеми Правобережного Лісостепу України зазнають значного антропогенного навантаження. Традиційні

© Врадій О.І., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

джерела забруднення, пов'язані з промисловою діяльністю, транспортом, інтенсивним веденням сільського господарства та застосуванням агрохімікатів, доповнюються новими викликами, спричиненими воєнними діями. Внаслідок використання різних видів озброєння, вибухових речовин, переміщення військової техніки та руйнування інфраструктури до навколишнього середовища потрапляє значна кількість токсичних елементів, серед яких особливу небезпеку становлять важкі метали. Потрапляючи у ґрунт, вони можуть тривалий час зберігатися в екосистемах, включатися у біогеохімічні цикли та накопичуватися в рослинній продукції [6].

Особливу актуальність ця проблема набуває щодо лісових грибів та ягід, які характеризуються високою здатністю до акумуляції важких металів із ґрунту та атмосферних випадінь. Багато видів грибів здатні накопичувати кадмій (Cd), свинець (Pb), мідь (Cu), цинк (Zn), нікель (Ni), хром (Cr) та інші елементи у концентраціях, що суттєво перевищують їх вміст у навколишньому середовищі. Аналогічні властивості притаманні й окремим видам дикорослих ягід. Саме тому гриби та ягоди розглядаються як ефективні біоіндикатори екологічного стану лісових екосистем і можуть слугувати важливими об'єктами моніторингу техногенного забруднення [1].

У межах наукового дослідження, що виконується за підтримки Гранту Президента України для молодих вчених – кандидатів наук (докторів філософії) віком до 35 років, особлива увага приділяється вивченню так званих «невидимих» наслідків війни. Йдеться про процеси накопичення важких металів у компонентах лісових екосистем, які не мають миттєвих проявів, проте можуть становити суттєву загрозу для екологічної безпеки, здоров'я населення та якості харчових ресурсів у довгостроковій перспективі [3].

Недостатність сучасних даних щодо рівнів накопичення важких металів у грибах та ягодах Правобережного Лісостепу, а також відсутність комплексної оцінки впливу воєнних та антропогенних факторів на їхній хімічний склад зумовлюють необхідність проведення відповідних досліджень. Отримані результати мають важливе значення для оцінки екологічного стану лісових екосистем, розроблення системи моніторингу забруднення та формування науково обґрунтованих рекомендацій щодо безпечного використання недеревних лісових ресурсів населенням України [8].

Актуальність дослідження. Сучасний етап розвитку лісогосподарської галузі України та світу характеризується безпрецедентними викликами, які мають комплексний екологічний, техногенний та мілітарний характер. Військові дії, системні лісові пожежі, транскордонне забруднення та кліматичні флуктуації призводять до глибокої деградації лісових екосистем. Водночас поза увагою дослідників часто залишається проблема трансформації якості недеревної продукції лісу (НДПЛ) – харчових ресурсів (ягід, грибів, горіхів, лікарських рослин, соків), які є надчутливими біоіндикаторами екологічного стану довкілля [9].

У контексті сучасних безпекових викликів актуальність вивчення якості НДПЛ зумовлена такими чинниками: 1. ризиками радіоактивного та хімічного забруднення. Внаслідок бойових дій та техногенних аварій у лісові біогеоценози потрапляє значна кількість токсикантів – важких металів (Pb, Cd, As, Cu), залишків вибухових речовин та радіонуклідів (^{137}Cs, ^{90}Sr). Лікарська сировина та гриби мають високу акумуляційну здатність, що створює пряму загрозу для здоров'я населення, яке традиційно використовує ці ресурси. 2. Трансформацією біохімічного складу**:** екологічний стрес, спричинений пірогенним впливом (пожежами) та хімічним навантаженням, змінює фізіолого-біохімічні процеси в рослинах-продуцентах НДПЛ. Це призводить до зниження концентрації корисних біоактивних речовин (вітамінів, антиоксидантів, ефірних олій) та накопичення токсичних метаболітів. 3. Необхідністю модернізації моніторингу: традиційні наземні методи оцінки ресурсного потенціалу лісу в умовах безпекових обмежень (мінування територій, обмежений доступ до лісових масивів) є малоефективними або небезпечними. Виникає гостра потреба в інтеграції сучасних геоінформаційних систем (ГІС) та технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) для дистанційного аналізу стану лісостанів та прогнозування якості недеревних ресурсів [10].

Таким чином, комплексний аналіз трансформації якості недеревної продукції лісу під впливом безпекових викликів є критично важливим для гарантування екологічної та продовольчої безпеки держави, збереження біорізноманіття та розробки стратегії післявоєнного відновлення лісового сектору на засадах збалансованого розвитку та європейських стандартів [2].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями.

Представлений авторський доробок пов'язаний із виконанням державних цільових програм, науково-дослідних тем та міжнародних зобов'язань України у сфері екологічної безпеки, збалансованого лісокористування та адаптації до європейських стандартів.

Зокрема, дослідження виконувались у рамках реалізації Гранта Президента України для підтримки наукових досліджень і розробок молодих вчених на 2026 рік з темою: «Оцінка екологічного стану недеревної продукції лісу, що зазнала наслідків військових дій в умовах Лісостепу Правобережного» (грантоотримувач Врадій О.І.) та державних екологічних стратегій та законів (Закону України «Про основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року», Державної стратегії управління лісами України до 2035 року, Національного плану відновлення України).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Недеревна продукція лісу (НПЛ), до якої належать дикорослі ягоди, їстівні гриби, лікарські рослини, горіхи та інші біологічні ресурси, відіграє важливу роль у забезпеченні продовольчої, соціальної та економічної безпеки населення. Особливого значення ці ресурси набувають для мешканців лісових регіонів України, де вони традиційно використовуються як джерело харчової сировини, лікарських засобів та додаткових доходів. Водночас якість і безпечність недеревної продукції лісу значною мірою залежать від екологічного стану лісових екосистем та рівня антропогенного навантаження [3].

Упродовж останніх десятиліть значна кількість наукових досліджень була присвячена вивченню особливостей накопичення забруднювальних речовин у компонентах лісових екосистем. Дослідження вітчизняних і зарубіжних учених свідчать, що дикорослі гриби та ягоди характеризуються високою здатністю до акумуляції важких металів, радіонуклідів та інших токсичних елементів. Особливо інтенсивно такі процеси відбуваються у грибах, які завдяки розвиненій грибниці активно поглинають елементи з ґрунтового середовища та лісової підстилки. Саме тому гриби вважаються одними з найчутливіших біоіндикаторів екологічного стану лісових екосистем [5].

Значний внесок у вивчення проблеми забруднення недеревної продукції лісу зробили дослідники радіоекологічних наслідків аварії на Чорнобильській АЕС. У численних роботах встановлено, що навіть через десятиліття після аварії дикорослі гриби та ягоди в окремих регіонах Полісся залишаються джерелом надходження радіонуклідів до організму людини. Особливо високими коефіцієнтами накопичення характеризуються чорниця (*Vaccinium myrtillus*), журавлина (*Vaccinium oxycoccos*), а також деякі види трубчастих грибів, зокрема білий гриб та польський гриб [10].

Поряд із радіонуклідним забрудненням останніми роками все більшої уваги набуває проблема накопичення важких металів у лісових харчових ресурсах. Наукові дослідження свідчать, що свинець, кадмій, мідь, цинк, нікель та інші токсичні елементи можуть накопичуватися в плодових тілах грибів і ягодах у концентраціях, що перевищують гранично допустимі рівні. Основними джерелами такого забруднення є викиди промислових підприємств, транспортні потоки, аграрне виробництво та атмосферне перенесення полютантів [18].

Останніми роками в Україні виник новий комплекс екологічних загроз, пов'язаний із повномасштабною війною. Внаслідок бойових дій значні площі лісових територій зазнали механічного руйнування, пожеж, вибухового впливу та хімічного забруднення. У наукових публікаціях останніх років дедалі частіше наголошується на необхідності оцінки довгострокових екологічних наслідків воєнних дій для лісових екосистем. Особливе занепокоєння викликає надходження до довкілля важких металів із залишків боєприпасів, військової техніки та продуктів горіння. Такі елементи можуть потрапляти у ґрунт, а згодом акумулюватися в рослинній продукції та грибах [16].

Сучасні дослідження свідчать, що серед найбільш небезпечних забруднювачів воєнного походження є свинець, кадмій, мідь, цинк, сурма, хром та нікель. Ці елементи здатні тривалий час зберігатися у верхніх горизонтах ґрунту та включатися в біогеохімічні цикли лісових екосистем. Водночас гриби та ягоди можуть виступати ефективними індикаторами таких змін, оскільки швидко реагують на трансформацію хімічного складу ґрунтового середовища [14].

У працях сучасних екологів також підкреслюється вплив кліматичних змін на якість недеревної продукції лісу. Підвищення середньорічної температури, збільшення частоти посух, зміна режиму опадів та зростання кількості лісових пожеж призводять до трансформації видового складу грибів і ягід, зміни їхньої продуктивності та біохімічних характеристик. Крім того, екстремальні погодні явища можуть посилювати міграцію токсичних елементів у системі «ґрунт – рослина – гриб» [13].

Аналіз наукової літератури свідчить, що питання впливу сучасних безпекових викликів на якість недеревної продукції лісу є відносно новим напрямом досліджень. Незважаючи на наявність значної кількості робіт щодо накопичення радіонуклідів і важких металів у грибах та ягодах, комплексна оцінка впливу воєнних дій, техногенних факторів і кліматичних змін на безпечність недеревних лісових ресурсів залишається недостатньо вивченою. Це обумовлює необхідність проведення подальших досліджень, спрямованих на моніторинг екологічного стану лісових екосистем, оцінку рівня забруднення дикорослої продукції та розроблення науково обґрунтованих рекомендацій щодо її безпечного використання населенням [11].

Таким чином, сучасні безпекові виклики формують нові ризики для якості недеревної продукції лісу, а дослідження процесів накопичення забруднювальних речовин у грибах та ягодах набуває особливої актуальності в контексті забезпечення екологічної, продовольчої та санітарно-гігієнічної безпеки України [10].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.

Незважаючи на значну кількість наукових праць, присвячених загальним питанням лісової екології, міграції радіонуклідів та накопиченню важких металів у фітомасі рослин, низка аспектів цієї глобальної проблеми залишається недостатньо вивченою.

Конкретні лакуни в наукових знаннях, на усунення яких спрямована ця стаття, охоплюють такі напрями, як відсутність комплексних моделей синергетичного впливу. Більшість чинних дослі-

джень аналізують вплив екотоксикантів ізольовано (наприклад, окремо радіоактивне забруднення або окремо пірогенний стрес). Натомість практично відсутні дані про синергетичний ефект – як одночасний вплив механічного пошкодження лісової підстилки, локального хімічного забруднення (компонентами вибухових речовин і паливно-мастильних матеріалів) та температурного шоку від пожеж змінює рухливість екотоксикантів у системі «ґрунт – НДПЛ».

Біохімічні бар'єри та коефіцієнти накопичення (Кн) екотоксикантів для деревних порід досліджено детально, тоді як для нижніх ярусів лісу (дикорослих ягідників, лікарських трав, мікобіоти) бракує систематизованих даних. Невирішеним залишається питання динаміки накопичення важких металів у дикорослих ресурсах за умов різкої зміни кислотності (pH) та мікробіологічної активності лісових ґрунтів після пожеж.

Технологічний розрив у методах екологічного моніторингу. Наявні методики оцінки якості недеревних ресурсів лісу базуються переважно на точковому польовому відборі зразків, що в умовах сучасних безпекових викликів (висока мінна небезпека лісів, пошкодження інфраструктури) є практично неможливим на значних площах. Алгоритми інтеграції даних ДЗЗ (індексів вегетації типу NDVI, EVI) із прогнозуванням хімічного стресу та якості підліскової сировини на ландшафтному рівні розроблені лише фрагментарно.

Вищезазначене визначає необхідність розробки нових науково-методологічних підходів до оцінки якості недеревної продукції лісу. Саме вирішенню цих прикладних та теоретичних завдань – від виявлення закономірностей біогеохімічної трансформації недеревних ресурсів до створення ГІС-орієнтованих моделей їх безпечної заготівлі – і присвячено цю статтю.

Новизна. Наукова новизна отриманих результатів полягає у теоретичному обґрунтуванні та експериментальному вирішенні важливого наукового завдання – оцінки закономірностей трансформації якості недеревної продукції лісу (НДПЛ) в умовах сучасних мілітарних, пірогенних та техногенних викликів.

Основні наукові результати, що визначають новизну дослідження, полягають у такому: вперше обґрунтовано концептуальну модель синергетичного впливу комбінованого навантаження (пірогенного деструкції лісової підстилки, механічного пошкодження ґрунтового покриву та локального забруднення сполуками військово-техногенного походження) на рухливість і транслокацію важких металів (Pb, Cd) та штучних радіонуклідів (^{137}Cs, ^{90}Sr) у системі «ґрунт – рослина/мікобіота».

Встановлено математичні залежності між індексами вегетації лісостанів (NDVI, EVI), отриманими за допомогою технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), та фактичним фітотоксичним стресом підліскового ярусу рослинності, що дозволяє дистанційно прогнозувати зони з високим екологічним ризиком для заготівлі недеревної сировини.

Удосконалено: методологічні підходи до оцінки екологічної безпеки НДПЛ шляхом інтеграції класичних методів радіоекологічного моніторингу із методами просторового ГІС-моделювання екологічних ризиків на ландшафтному рівні (зокрема, в умовах обмеженого фізичного доступу до лісових масивів). Значення коефіцієнтів накопичення (Кн) та переходу (Кп) важких металів і радіонуклідів для домінантних видів лікарських рослин, дикорослих ягід та грибів у лісових біогеоценозах Правобережного Лісостепу України (зокрема, на базі досліджень у Гніванському та Калинівському лісництвах) з урахуванням сучасних змін фізико-хімічних властивостей ґрунтів.

Дістали подальшого розвитку: наукові положення щодо біоіндикаційної спроможності окремих видів мікобіоти та трав'янистих рослин як експрес-індикаторів локального хімічного та пірогенного забруднення лісових екосистем та підходи до гармонізації вітчизняних нормативно-гігієнічних вимог до безпечності дикорослої продукції лісу з регламентами Європейського Союзу в умовах зростання екологічних ризиків воєнного часу.

Методологічне або загальнонаукове значення. Обґрунтування вибору саме цих локацій (Калинівського лісництва та лісових масивах поблизу с. Бохоники Вінницького району), які зазнали опосередкованого, але гострого мілітарного та пірогенного впливу, має глибоке методологічне та загальнонаукове значення для екологічної науки.

Дослідження процесів міграції екотоксикантів та трансформації якості недеревної продукції лісу (НДПЛ) на базі лісництв Вінницької області, що постраждали від ракетних ударів, детонацій та падіння уламків засобів повітряного нападу, має важливе методологічне та загальнонаукове значення, яке полягає у розробці моделі оцінки латентного (прихованого) мілітарного впливу. Переважна більшість сучасних екологічних досліджень фокусується на зонах прямих бойових дій (де забруднення є очевидним і суцільним). Натомість методологічна цінність цієї роботи полягає у створенні алгоритму оцінки «точкового» та дифузного забруднення лісів у відносно тилових регіонах. Це дає змогу типізувати подібні екологічні загрози для інших областей України та світу, що зазнають регулярних ракетно-дронових атак.

Інтеграція різномасштабних методів моніторингу. У роботі методологічно об'єднано локальний інструментальний аналіз (хіміко-аналітичні та радіоекологічні вимірювання на конкретних тест-майданчиках у Бохониках та Калинівці) із регіональним просторовим моделюванням (ГІС-картографування, аналіз траєкторій розсіювання аерозолів та продуктів детонації). Це створює методологічний прецедент для оптимізації екологічного моніторингу лісів в умовах обмеженого фізичного доступу.

Стандартизація процедур біоіндикації. Обґрунтовано та методично систематизовано використання НДПЛ (грибів, дикорослих ягід, лікарських рослин) як чутливих експрес-індикаторів техногенного стресу лісових екосистем. Розроблені коефіцієнти транслокації та накопичення важких металів військового походження можуть бути інтегровані в державні методики моніторингу лісових ресурсів.

Отримані результати збагачують фундаментальні уявлення про поведінку хімічних елементів у біосфері. Дослідження виявляє, як екстремальні фізико-хімічні чинники (пірогенне руйнування лісової підстилки, локальна зміна кислотності ґрунту внаслідок детонації вибухових речовин) впливають на термодинамічну рухливість металів і радіонуклідів, прискорюючи або сповільнюючи їхнє надходження в живі організми.

Науково доведено, що безпекові виклики воєнного стану мають довготривалий екологічний «післядію». Робота вносить вклад у фундаментальну концепцію екологічної безпеки територій, демонструючи, що навіть відсутність активних наземних боїв не гарантує токсикологічної чистоти харчових та лікарських ресурсів лісу.

Наукові результати щодо транскордонної міграції та трансформації якості недеревних ресурсів створюють теоретичну базу для адаптації лісогосподарських нормативів України до Європейського зеленого курсу та стандартів безпеки харчових продуктів ЄС.

Вивчення лісових масивів навколо Калинівки, Бохоників дозволяє вийти за межі локального опису проблеми й сформувати універсальну науково-методологічну базу для оцінки, прогнозування та мінімізації латентних радіоекологічних і токсикологічних ризиків у лісових екосистемах, що зазнали непрямого воєнного впливу.

Виклад основного матеріалу. Експериментальні дослідження, проведені протягом 2024–2026 рр. у лісових масивах Вінницької області, дозволили встановити чіткі закономірності трансформації екологічного стану лісових біогеоценозів та якості недеревної продукції лісу (НДПЛ) під впливом сучасних воєнно-техногенних та пірогенних викликів.

Первинною ланкою в ланцюгу міграції екотоксикантів є лісовий ґрунт (особливо лісова підстилка та верхній акумулятивний горизонт 0–10 см), який безпосередньо зазнає хімічного, радіаційного та пірогенного навантаження. Аналіз зразків ґрунту з досліджуваних лісництв виявив суттєві відхилення від контролю (табл. 1).

У лісових кварталах Калинівського лісництва зафіксовано найінтенсивніше зниження показника pH до 5,1 (підкислення ґрунту). Цей процес зумовлений пірогенним фактором (локальними пожежами від детонацій) та випадінням кислих аерозольних осадів після вибухів боєприпасів. Зниження pH призвело до деструкції ґрунтового поглинального комплексу та різкого зростання рухливості важких металів та штучних радіонуклідів: концентрація рухомих форм Pb зросла у 7,0 раза, Cd – у 8,4 раза, а питома активність стронцію-90 (^{90}Sr) збільшилася у 5,6 раза порівняно з контролем.

У Гніванському лісництві (поблизу с. Бохоники) зафіксовано підвищений вміст рухомих форм Pb (5,1 мг/кг), а також помітне зростання питомої активності ^{90}Sr до 39 Бк/кг, що методологічно пов'язується із деструкцією лісової підстилки вибуховими хвилями та подальшим вивільненням радіонуклідів із зв'язаних форм у ґрунтовому розчині.

У таблиці 2 відображено фактичний вміст токсикантів (Pb, Cd) та питому активність радіонуклідів (^{137}Cs, ^{90}Sr) у сухій речовині модельних об'єктів.

Результати таблиці 2 демонструють, що гриби є найпотужнішими концентраторами забруднювачів. У білому грибі та лисичці звичайній з Калинівського лісництва зафіксовано критичні рівні накопичення кадмію (1,85 мг/кг та 1,46 мг/кг відповідно), що перевищує фонові значення більш ніж у 20 разів. Одночасно питома активність стронцію-90 у плодових тілах лисички звичайної досягла максимуму у 112 Бк/кг з високим коефіцієнтом накопичення (Кн = 1,65). Це підтверджує інтенсивне винесення радіоізотопу з підкисленого лісового ґрунту міцелієм гриба через його хімічну аналогію до стабільного кальцію.

Кропива дводомна, відібрана у Гніванському лісництві (ділянки Бохоники), підтвердила свій ста-

Таблиця 1

Фізико-хімічні показники та вміст токсикантів у верхньому шарі ґрунту (0-10 см) досліджуваних лісництв (середні дані за 2024–2026 рр.)

Показник	Контроль (природний фон)	Калинівське лісництво (зона впливу детонацій)	Гніванське лісництво (ділянки поблизу с. Бохоники (місця падіння уламків БПЛА))
pH H_2O	6,2 ± 0,2	5,1 ± 0,3	5,7 ± 0,2
Рухомі форми Pb, мг/кг	1.2 ± 0.1	8,4 ± 0,9	5,1 ± 0,6
Рухомі форми Cd, мг/кг	0,05 ± 0,01	0,42 ± 0,05	0,28 ± 0,03
Питома активність ^{137}Cs, Бк/кг	45 ± 6	185 ± 22	92 ± 11
Питома активність ^{90}Sr, Бк/кг	12 ± 2	68 ± 8	39 ± 5

ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

Таблиця 2

Вміст важких металів та питома активність радіонуклідів у об'єктах НДПЛ досліджуваних лісництв (в перерахунку на суху речовину, середні дані за 2024–2026 рр.)

Об'єкт дослідження / локація відбору	Свинець (Pb), мг/кг	Кадмій (Cd), мг/кг	^{137}Cs, Бк/кг	^{90}Sr, Бк/кг	Коефіцієнт накопичення стронцію (Кн для ^{90}Sr)
Білий гриб (*Boletus edulis*)					
Контроль (фон)	0,22 ± 0,03	0,08 ± 0,01	58 ± 7	14 ± 2	1,17
Калинівське лісництво	1,42 ± 0,18	1,85 ± 0,22	385 ± 44	96 ± 11	1,41
Гніванське лісництво (Бохоники)	0,94 ± 0,11	1,12 ± 0,14	162 ± 19	54 ± 6	1,38
Лисичка звичайна (*Cantharellus cibarius*)					
Контроль (фон)	0,18 ± 0,02	0,06 ± 0,01	84 ± 9	11 ± 1	0,92
Калинівське лісництво	1,15 ± 0,14	1,46 ± 0,16	420 ± 48	112 ± 13	1,65
Гніванське лісництво (Бохоники)	0,62 ± 0,07	0,78 ± 0,09	118 ± 14	32 ± 4	1,23
Кропива дводомна (*Urtica dioica L.*)					
Контроль (фон)	0,12 ± 0,01	0,02 ± 0,003	18 ± 2	8 ± 1	0,67
Гніванське лісництво (Бохоники)	0,78 ± 0,09	0,24 ± 0,03	42 ± 5	57 ± 7	1,46
Суниця лісова (*Fragaria vesca L.*, плоди)					
Контроль (фон)	0,09 ± 0,01	0,01 ± 0,001	12 ±1	5 ± 1	0,42
Гніванське лісництво (Бохоники)	0,85 ± 0,10	0,15 ± 0,02	34 ± 4	18 ± 2	0,69

тус рослини-кальцієфіла. Вона показала аномально високий коефіцієнт накопичення стронцію-90 (Кн = 1,46 при фоновому показникові 0,67), акумулювавши в надземній масі до 57 Бк/кг радіонукліда. В умовах деградації та збіднення ґрунту на доступний обмінний кальцій рослина активно компенсує цей елемент його хімічним аналогом – ^{90}Sr.

У плодах суниці лісової з Гніваанськго лісництва виявлено помірне, але чітке зростання вмісту свинцю до 0,85 мг/кг та ^{90}Sr до 18 Бк/кг сухої маси, що свідчить про наявність латентного (прихованого) забруднення харчової сировини навіть на суттєвій відстані від епіцентрів бойових дій та детонацій.

Для інтеграції локальних даних у загальну систему моніторингу було ведено кореляційний аналіз між спектральними характеристиками лісостанів та токсикологічним навантаженням.

З використанням знімків супутників Sentinel-2 у середовищі QGIS v3.34 розраховано вегетаційний індекс NDVI для тестових кварталів Гніванського та Калинівського лісництв.

$$NDVI = NIR – Red / NIR + Red \qquad (1.1)$$

Встановлено зворотний кореляційний зв'язок між значенням індексу NDVI у середині вегетаційного періоду (липень) та показниками забруднення ґрунту: коефіцієнт кореляції з питомою активністю ^{90}Sr у верхньому шарі становив r = -0,65, а з концентрацією рухомого Pb – r = -0.72.

Зниження NDVI до рівня 0,55–0,62 (при нормі здорового деревостану 0,78–0,85) чітко збігається з межами зон розсіювання аерозольних продуктів вибухів та пожеж. Це дозволяє використовувати карти вегетаційних індексів як предиктивну основу для дистанційного виділення територій, непридатних для безпечної заготівлі НДПЛ.

Головні висновки. Проведені комплексні еколого-радіоекологічні дослідження у лісових масивах Вінницької області протягом 2024–2026 рр. дозволили сформулювати такі наукові та практичні висновки. Установлено закономірності деструкції лісових ґрунтів під впливом мілітарно-пірогенного навантаження. Показано, що локальні вибухи, детонація боєприпасів та пожежі призводять до суттєвого підкислення верхнього шару лісового ґрунту (0-10 см), зокрема в Калинівському лісництві показник pH знизився до 5,1±0,3. Це підкислення руйнує ґрунтовий поглинальний комплекс і переводить важкі метали та радіонукліди у високорухливі, біодоступні форми. Унаслідок цього концентрація рухомих форм свинцю Pb у ґрунті зросла до 8,4 мг/кг (у 7 разів), кадмію Cd – до 0,42 мг/кг (у 8,4 раза), а питома активність стронцію-90 (^{90}Sr) досягла 68 Бк/кг (збільшення у 5,6 раза порівняно з контролем).

Виявлено вибірковий характер акумуляції забруднювачів недеревною продукцією лісу. Експериментально доведено, що дикорослa харчова та лікарська сировина демонструє надзвичайно високу здатність до накопичення екотоксикантів. Максимальні концентрації зафіксовано в мікобіоті: у білому грибі (*Boletus edulis*) вміст кадмію зріс до 1,85 мг/кг сухих речовин, а питома активність ^{90}Sr

у лисичці звичайній (*Cantharellus cibarius*) досягла 112 Бк/кг з коефіцієнтом накопичення Кн = 1,65. Кропива дводомна (*Urtica dioica L.*) виявила властивості суперакумулятора радіостронцію (Кн = 1,46), що фізіологічно зумовлено її приналежністю до кальцієфілів та активним заміщенням дефіцитного кальцію його радіоактивним аналогом ^{90}Sr.

Обґрунтовано використання ГІС та супутникових даних для предиктивного екологічного моніторингу. Розроблено методичний підхід, що базується на інтеграції наземних вимірювань та супутникових знімків Sentinel-2. Установлено статистично значущий зворотний кореляційний зв'язок між вегетаційним індексом лісостанів NDVI та радіохімічним навантаженням на екосистему (коефіцієнт кореляції з питомою активністю ^{90}Sr у ґрунті становить r = -0,65, зі свинцем – r = -0,72). Локальне пригнічення рослинності та зниження NDVI до 0,55–0,62 у зонах розсіювання продуктів вибухів дозволяє використовувати ГІС-картографування як предиктивну модель для дистанційного виявлення небезпечних для заготівлі недеревних ресурсів лісу територій.

Розроблено рекомендації для безпечного природокористування в поствоєнний період. З метою гарантування продовольчої безпеки населення та збереження якості лікарської сировини обґрунтовано необхідність впровадження обов'язкового радіоекологічного та токсикологічного скринінгу недеревних ресурсів лісу (насамперед дикорослих грибів, ягід та медичних трав) у радіусі до 5 км від зафіксованих воєнно-техногенних інцидентів. Промислову заготівлю сировини в межах даних зон ризику рекомендовано тимчасово обмежити до повної ревіталізації екосистем.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати проведеного дослідження відкривають низку пріоритетних напрямів для подальшої науково-практичної розробки еколого-радіоекологічних аспектів безпеки лісових екосистем:

1. Дослідження довгострокової міграції та перерозподілу екотоксикантів у системі «ґрунт – рослина – гриб». Необхідно розширити часовий горизонт спостережень для оцінки динаміки вивільнення зв'язаних форм важких металів та радіонуклідів (насамперед ^{90}Sr) під впливом природних біогеохімічних процесів, кореневих екссудатів та мікоризних грибів. Окрему увагу слід приділити вивченню синергічного впливу сукупного забруднення (важкі метали + радіонукліди) на фізіологічний стан недеревних рослинних ресурсів.

2. Оцінка ефективності фіто- та мікоремедіаційних технологій. Перспективним є експериментальне вивчення здатності окремих дикорослих видів-гіперакумуляторів (зокрема, кропиви дводомної та певних штамів макроміцетів) до локального очищення забруднених ґрунтів лісових екосистем. Розробка та випробування екологічно безпечних методів інактивації рухомих форм токсикантів у ґрунті (наприклад, через внесення сорбентів, біочару чи вапнування) дозволить прискорити природні процеси відновлення лісових угідь.

3. Удосконалення ГІС-технологій та моделей предиктивного картографування. Подальша робота має бути спрямована на інтеграцію даних дистанційного зондування Землі надвисокої просторової розрізненості з алгоритмами машинного навчання. Створення автоматизованих моделей, які за динамікою індексів вегетації (NDVI, EVI) та стресу рослинності (NDRE) зможуть з точністю до окремого виділу прогнозувати зони підвищеного вмісту важких металів і радіонуклідів у недеревній продукції, дозволить розробити інтерактивні карти екологічного ризику для лісокористувачів.

4. Оцінка кумулятивного ризику для здоров'я населення. Важливим кроком є перехід від констатації вмісту токсикантів у сировині до математичного моделювання дозових навантажень на організм людини через трофічні ланцюги. Оцінка індивідуального та популяційного ризиків при споживанні дикорослих ягід і грибів із зон воєнно-техногенного навантаження дозволить розробити науково обґрунтовані національні стандарти та гігієнічні регламенти безпеки лісової продукції у поствоєнний період.

Література

1. Матусяк М.В., Нейко І.С., Нейко О.В., Юрків З.М. Вплив інтенсивності зрідження клонових плантацій дуба звичайного (Quercus robur L.) на плодоношення в умовах Вінниччини Таврійський науковий вісник. Серія: Сільськогосподарські науки. 2026. Вип. 148. Ч. 2. С. 353-362. DOI: https://doi.org/10.32782/2226-0099.2026.148.2.41
2. Razanov S., Melnyk V., Symochko L., Dydiv A., Vradii O., Balkovskyi V., Khirivskyi P., Panas N., Lysak H., Koruniak O. Agroecological assessment of gray forest soils under intensive horticulture. *International Journal of Ecosystems and Ecology Science (IJEES).* 2022. Vol. 12 (4). P. 459–464. DOI: https://doi.org/10.31407/ijees12.4
3. Tkachuk O.P. Prerequisites for the transition of agriculture in Ukraine to ecologically balanced principles. Ecological sciences. 2022. № 5 (44). P. 144-149. doi: 10.32846/2306-9716/2022.eco.5-44.21
4. Neiko I.S., Matusiak M.V., Neiko O.V., Vradii O.I., Alieksieiev O.O. Characteristics of the condition and reproductive processes of trees in a clone plantation of *Pinus sylvestris L.* finnish origin in the conditions of Lytyn Forestry of the Vinnytsky Regional Forestry. *Сільське господарство та лісівництво.* 2025. № 4 (39). С. 15-29. doi: 10.37128/2707-5826-2025-4-2
5. Алєксєєв О.О., Врадій О.І., Разанов О.С., Салямон А.В. Інтенсивність накопичення радіонуклідів урожаєм еспарцету піщаного за його вирощування в умовах Полісся. *Аграрні інновації.* 2025. № 32. С. 7–11. https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2025.32.1

6. Razanov S., Matusiak M., Bondar A., Vradii O. Bioecological and energy potential of *Robinia Pseudoacacia L.* stands under the conditions of the Vinnytsia forestry district of SE "Forests of Ukraine". *Збалансоване природокористування.* 2025. № 2. С. 85-93. doi: 10.33730/2310-4678.2.2025.337151
7. Панкова С.О., Бондар А.О., Матусяк М.В., Піддубна А.М. Методологічні та методичні засади моніторингу лісів України. *Український журнал природничих наук.* 2025. № 13. С. 394-401. https://doi.org/10.32782/naturaljournal.13.2025.37
8. Алєксєєв О.О., Врадій О.І. Вивчення інтенсивності накопичення важких металів рослинами буркуну білого (*Melilotus albus*) на ґрунтах, що зазнали впливу бойових дій. *Аграрні інновації.* 2025. № 30. С. 18–24. https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2025.30.2
9. Matusyak M., Vradii O. Assessment of the success of the introduction and persprctives of the use of *Aesculus Pavia* in the conditions of Vinnitsa. *Сільське господарство та лісівництво.* 2025. № 1 (36). С. 147-159. doi: 10.37128/2707-5826-2025-1-11
10. Vradii O., Kovka N. Study of changes in the concentration of heavy metals in mushrooms during canning. *Agroecology, agriculture, forestry and horticulture in the 21st century: problems and solutions*. Monograph. Edited by S. Stankevych, O. Mandych. Tallinn: Teadmus OÜ, 2025. P. 126–139.
11. Wu D., Pulkkinen P., Pappinen A., Neyko I., Zhang G., Di Heinonen J., Repo T. Frost hardiness of Finnish plus tree progenies of Scots pine from seed orchards in Finland and Ukraine. *Eur J Forest Res.* 2023. Vol. 142. P. 1467-1477 https://doi.org/10.1007/s10342-023-01606-4.
12. Vradii O.I., Alieksieiev O.O. Ecological and economic assessment of the state of forest ecosystems in the conditions of marital state in Ukraine. *Аграрні інновації.* 2024. № 27. С. 29–36. https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2024.27.4
13. Vradii O., Alieksieiev O. Intensity of accumulation of toxicants by non-wood forest products. *Agroecology, agriculture, forestry and horticulture in the 21st century: problems and solutions*. Monograph. Edited by S. Stankevych, O. Mandych. Tallinn: Teadmus OÜ, 2025. P. 377–394.
14. Матусяк М.В., Нейко І.С. Особливості репродуктивних процесів на клонових плантаціях дуба звичайного різних режимів зрідження в умовах Вінниччини. *Сільське господарство та лісівництво.* 2026. № 2 (41). С. 90-101. doi: 10.37128/2707-5826-2026-2-8
15. Нейко І.С., Матусяк М.В., Нейко О.В. Особливості стану та репродукції основних лісотвірних порід та горіхоплідних в умовах Лісостепу. Scientific strategies for conserving and restoring natural ecosystems under anthropogenic pressure: monograph. Riga, Latvia: «Baltija Publishing», 2026. P. 2-26. https://doi.org/10.30525/978-9934-26-654-6-1
16. Neyko I., Yurkiv Z., Matusyak M., Katerynchak Yu. Condition of the permanent forest seed base objects of the Slavuta Forestry branch of the State Enterprise "Forests of Ukraine". Наукові доповіді НУБіП України. 2024. Т. 20. № 5. С. 90-104. doi: 10.31548/dopovidi/5.2024.90
17. Pavlenko A.P., Orlov O.O., Landin V.P., Chobotko G.M., Tyshchenko O.G., Musych O.G., Solomko V.L., Feshchenko V.P. Bioindication of ^{137}Cs contamination of forest ecosystems using test objects. *Agroecological Journal.* 2020. № 1. P. 19-27.
18. Матусяк М.В., Бондар А.О., Панкова С.О. Оцінка техногенного впливу на стан насаджень лісопаркової зони м. Вінниця. *Таврійський науковий вісник. Серія: Сільськогосподарські науки.* 2026. Вип. 143. Ч. 2. С. 319-325. https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.143.2.36

Дата першого надходження статті до видання: 16.07.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

УДК 504.054:504.3.054::622.2
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.6

ПРОБЛЕМНІ АСПЕКТИ ЩОДО ЗВІТУВАННЯ ТА ВЕРИФІКАЦІЇ ВИКИДІВ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ

Дригулич С.П.[1] (orcid.org/0009-0001-7578-9523),
Орфанова М.М.[1] (orcid.org/0000-0002-4931-8074),
Дригулич П.Г.[2] (orcid.org/0009-0008-6546-8161)
[1]Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, 76019, м. Івано-Франківськ
[2]ГО «Центр сталого розвитку громад»
вул. Кн. Ольги, 3/62, 82107, м. Дрогобич
serhii.dryhulych@nung.edu.ua, mariia.orfanova@nung.edu.ua, pzy@ukr.net

У статті здійснено комплексний аналіз правових і практичних викликів функціонування національної системи моніторингу, звітності та верифікації (МЗВ) викидів парникових газів в Україні. Досліджено колізію між євроінтеграційними зобов'язаннями держави та реальними спроможностями бізнесу в умовах воєнного стану після відновлення обов'язкового звітування з 1 лютого 2025 року. Обґрунтовано нереалістичність чинного законодавчого терміну подання верифікованих звітів операторів (до 31 березня наступного року). Основними чинниками цього визначено затримки в отриманні базової державної статистичної звітності (яка формується лише до кінця лютого), тривалі процедури тендерних закупівель послуг верифікації, логістичні ускладнення, зумовлені воєнними діями та значна розкиданість об'єктів по території України, критичний дефіцит акредитованих органів контролю (всього 10 установ на 518 зареєстрованих об'єктів станом на 2026 рік). Окрему увагу приділено підприємствам нафтогазової галузі (зокрема Групі Нафтогаз), де через виснаженість родовищ, з метою збільшення видобутку газу, широко впроваджуються дотискні компресорні станції, номінальна потужність яких перевищує 20 МВт, що автоматично підпорядковує їх дії закону про МЗВ, що у свою чергу несе значні фінансові навантаження на ці підприємства. Доведено, що жорсткі часові обмеження створюють штучні ризики масового безпідставного притягнення суб'єктів господарювання до адміністративної відповідальності. Для розв'язання наявних проблем та гармонізації екологічного законодавства України із Виконавчим Регламентом Комісії (ЄС) 2018/2066 запропоновано конкретні законодавчі зміни. Рекомендовано перенести кінцевий строк подання звіту оператора на 30 червня, а також запровадити диференційовані терміни звітування про вдосконалення методології залежно від категорій установок (А, Б, В) та звільнити від цього обов'язку прості об'єкти з низькими обсягами викидів. *Ключові слова:* моніторинг, звітність та верифікація (МЗВ), викиди парникових газів, звіт оператора, нафтогазова галузь, дотискні компресорні станції, законодавчі зміни.

Challenging aspects of greenhouse gas emissions reporting and verification. Dryhulych S., Orfanova M., Dryhulych P.
This article provides a comprehensive analysis of the legal and practical challenges associated with the operation of Ukraine's national greenhouse gas Monitoring, Reporting and Verification (MRV) system. The study examines the conflict between the state's European integration commitments and the actual capacity of businesses to comply with MRV requirements under martial law following the resumption of mandatory reporting on 1 February 2025.

The article substantiates the impracticality of the current statutory deadline requiring operators to submit verified emissions reports by 31 March of the following year. The key factors contributing to this challenge include delays in obtaining baseline state statistical data, which becomes available only by the end of February, lengthy public procurement procedures for verification services, logistical difficulties caused by military operations and the geographical dispersion of facilities across Ukraine, as well as a critical shortage of accredited verification bodies, with only ten institutions serving 518 registered installations as of 2026.

Particular attention is paid to the oil and gas industry, especially the Naftogaz Group. Due to the depletion of mature hydrocarbon fields, booster compressor stations with a rated capacity exceeding 20 MW are increasingly being deployed to maintain and increase natural gas production. As a result, such facilities fall within the scope of the MRV legislation, imposing significant financial burdens on operators.

The study demonstrates that the current reporting deadlines create artificial risks of widespread and unjustified administrative liability for business entities. To address these challenges and further harmonize Ukrainian environmental legislation with Commission Implementing Regulation (EU) 2018/2066, specific legislative amendments are proposed. In particular, it is recommended to extend the deadline for submitting operators' reports until 30 June, introduce differentiated deadlines for reporting methodological improvements depending on installation categories (A, B and C), and exempt low-emission installations from this obligation. *Key words:* Monitoring, Reporting and Verification (MRV); greenhouse gas emissions; operator report; oil and gas industry; booster compressor stations; environmental legislation; legislative amendments.

© Дригулич С.П., Орфанова М.М., Дригулич П.Г., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. У межах виконання Угоди про асоціацію з Європейським Союзом, Україна зобов'язалася впровадити систему моніторингу, звітності та верифікації (далі – також МЗВ) викидів парникових газів. Цей крок передбачає наближення національного екологічного законодавства до європейських стандартів через імплементацію Директив Європейського Парламенту та Ради 2003/87/ЄС [1], яка регулюють систему торгівлі викидами в ЄС і 2004/101/ЄС [2], яка пов'язує систему торгівлі викидами Європейського Союзу з проєктними механізмами Кіотського протоколу [3], що спрямований на зниження викидів парникових газів, боротьбу з глобальним потеплінням та введення ринкових квот. На виконання цих вимог у грудні 2019 року було ухвалено базовий Закон України «Про засади моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів» [4], який повноцінно запрацював з 1 січня 2021 року.

З початком повномасштабного вторгнення почав діяти Закон України «Про захист інтересів суб'єктів подання звітності та інших документів у період дії воєнного стану або стану війни» [5]. Відповідно до нього, екологічна звітність на період воєнного стану набула добровільного характеру. Але 1 лютого 2025 року набули чинності зміни до Закону України «Про засади моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів» (далі – також Закон) [4], які скасували цей привілей та повністю відновили обов'язкову систему МЗВ. Цими змінами, у Прикінцевих та перехідних положеннях було передбачено, що Оператор мав право не подавати звіт за 2021, 2022 та 2023 звітні роки, а за 2024 рік мав право подати звіт до кінця року, в якому цей Закон набирає чинності, тобто до 31 грудня 2025 року. Далі необхідно звітувати кожен рік до 31 березня року за звітним періодом. Однак, такі терміни для більшості операторів установок є нереальними.

Актуальність дослідження. На даний час існує гостра правова та практична колізія між євроінтеграційними зобов'язаннями України та реальними спроможностями бізнесу в умовах війни. Частина виробничих об'єктів нафтогазової галузі пошкоджена, знищена або перебуває в зоні бойових дій. Крім цього, на завершальній стадії розробки газових родовищ, через значне падіння пластових тисків, з метою збільшення видобутку газу більш широко використовуються дотискні компресорні станції, в результаті чого зростає кількість установок, які підпадають під дію цього Закону. В Україні недостатньо акредитованих органів, здатних перевірити значну кількість звітів за короткий проміжок часу. Невиконання чинних нормативно-правових актів через форс-мажорні обставини веде до безпідставного тиску на бізнес.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Робота виконана в рамках реалізації «Стратегії екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату на період до 2030 року» [6], яка затверджена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 20 жовтня 2021 р. № 1363-р. Стратегією визначено, що однією з основних проблем у сфері охорони довкілля та природних ресурсів, які негативно впливають на здоров'я людей та сталість екосистем, є забруднення навколишнього природного середовища викидами в атмосферне повітря та скидами у водні об'єкти від промислових підприємств.

Також розпорядженням Кабінету Міністрів України від 21 лютого 2025 р. № 146-р затверджено «План заходів щодо створення національної системи торгівлі квотами на викиди парникових газів» [7], яким передбачено внесення змін до нормативно-правових актів у сфері моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів відповідно до оновлених регламентів ЄС щодо моніторингу та звітності про викиди парникових газів, верифікації та акредитації верифікаторів.

Практичними завданнями є оптимізація методології екологічного моніторингу парникових газів та розробці адаптаційних інструментів для збереження цілісності системи МЗВ в умовах воєнних руйнувань та дефіциту даних. Робота розширює наукове розуміння інструментів кліматичного менеджменту, адаптуючи європейські стандарти Директив 2003/87/ЄС [1] і 2004/101/ЄС [2] до специфічних реалій кризового стану національної екосистеми та промисловості в Україні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Багато науковців підкреслюють [8-11], що прийняття ЗУ України «Про засади моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів» [4] є важливим кроком імплементації законодавства України в систему законодавств ЄС, що впроваджує основні положення Директив 2003/87/ЄС [1] і 2004/101/ЄС [2] та виконують вимоги Рамкової конвенції Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату [12] та Паризької угоди [13]. Також впровадження системи моніторингу, звітності, верифікації є важливим елементом процесу декарбонізації економіки України та її інтеграції до європейського зеленого курсу [10]. Впровадження стандартів GRI в Україні та перспектив адаптації ESRS і ISSB сприятиме гармонізації обліково-аналітичних процесів та прозорості корпоративної звітності [11].

Deswal, S., & Deswal, P. у своїх дослідженнях встановили, що у період 2000-2023 роки зросли викиди парникових газів на 46,41% або з 36,18 до 52,96 гігатонн еквіваленту CO_2 [14]. Китай, США та Індій є лідерами викидів парникових газів, на долю яких припадає майже 59% світових викидів парникових газів.

Встановлено, що в Україні 64% викидів парникових газів припадає на енергетичний сектор. До того ж динаміка викидів від неорганізованих джерел зростала у період до 2000 року, що пов'язано із вико-

ристанням застарілого обладнання, та з наступним зменшенням до 24,0 % у 2021 році через зменшення, в головному, видобутку та використання викопних палив в Україні [10].

Зменшення викидів парникових газів і досягнення нульових викидів вуглецю є особливо актуальним для підприємств нафтогазової галузі. Результати дослідження для 50 найбільших нафтогазових компаній, які котируються на біржі Bursa Malaysia, підтвердили важливість дотримання з Протоколу з парникових газів п'яти принципів: актуальність, повнота, узгодженість, прозорість та точність, і доводять, що звітність про сталий розвиток вуглецевої галузі частково опосередковує взаємозв'язок між повнотою, прозорістю, точністю та нульовими викидами вуглецю [15].

Вагомий внесок в утворенні парникових газів належить відходам, обсяги утворення яких щорічно збільшується, а об'єми їх оброблення залишаються на низькому рівні. Відповідно спостерігається динаміка збільшення відходів на полігонах. Широке запровадження концепції циркулярної економіки, сучасних методів збору та оброблення відходів сприятиме скороченню викидів парникових газів [16].

За результатами дослідження [17] встановлено, що звітність у сфері сталого розвитку впливає на показники скорочення викидів вуглецю. Так, у 2024 році вже 95% компаній зі списку G250 публікують цільові показники щодо скорочення викидів вуглецю, що на 15% більше порівняно з 2022 роком. Також, 30% зі 100 найбільших компаній враховує принципи сталого розвитку при розрахунку заробітної плати керівників. Регуляторним органам слід зосередитися на чітких правилах звітності та надавати стимули компаніям для впровадження комплексних систем обліку викидів парникових газів на основі стандартів звітності [15].

Краковська С., Букша І., Волошенюк О. у своїх дослідженнях визначають напрями вдосконалення системи інвентаризації парникових газів в Україні та використання ГІС-технологій і дистанційного зондування Землі для оцінки викидів парникових газів [9].

Для забезпечення якісного аналізу даних важливими також є моніторингові спостереження за викидами парникових газів [9]. Важливим кроком для обліково-аналітичного забезпечення звітності на підприємств є комплексний методичний підхід га основі узагальнення, систематизації, аргументації, порівняння, емпіричного аналізу [11], що створює єдиний інформаційний простір обліково-аналітичної інформації. Чміль Є.Л. розробив концептуальну модель обліково-аналітичного забезпечення сталого розвитку підприємств аграрного сектору [18].

У свою чергу, пом'якшення наслідків зміни клімату, збереження та відновлення екосистем має базуватись для прийняті обґрунтованих природоохоронних рішеннях [9]. Запропоновано прототип технологічного рішення, що використовує блокчейн, невзаємозамінні токени та смарт-контракти для відстеження та звітності щодо викидів парникових газів, що дозволить відстежувати походження викидів парникових газів [19].

На сьогодні розроблені Рекомендацій є надання чітких процедурних та методологічних інструкцій щодо моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів із деградованих, осушених або потенційно відновлюваних торфовищ в Україні [9], які адаптовані до української нормативно-законодавчої системи на основі міжнародного досвіду.

Для визначення ефективності впровадження заходів мінімізації викидів парникових газів науковцями Лабенком О. і Самойлик Ю. запропоновано три сценарії [16]: 1) збільшення податкових пільг для підприємств для зниження рівня викидів, оцінка впливу на економіку, зайнятість та екологічний стан; 2) введення нових екологічних стандартів та субсидій для впровадження відновлювальних джерел енергії, аналіз економічних вигод та довгострокових ефектів для державного бюджету; 3) розвиток ринку вуглецевих кредитів і впровадження ринкових механізмів для стимулювання скорочення викидів у промисловості.

Не менш актуальним є оптимізація фінансових стимулів обґрунтування сценаріїв скорочення викидів, що впливає на мотивацію бізнесу до використання низьковуглецевих технологій, через впровадження вуглецевих кредитів, як ринкових інструментів зниження викидів [16]. З метою обґрунтованого прийняття рішень щодо управлінської звітності розроблено форму «Звіт про стан сталого інноваційного розвитку підприємства», яка інтегрує чотири блоки інформації: фінансово-економічний, науково-технологічний, екологічний і соціальний, що забезпечує комплексну багатокритеріальну оцінку результативності прийняття рішень [18].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Система моніторингу, звітності та верифікації є ключовим інструментом для реалізації та регулювання заходів з декарбонізації. Вони включають: вимірювання і моніторинг даних, передачу даних у спеціальну систему і перевірку точності даних, що передаються [20]. Для оцінки ефективності заходів щодо вирішення кліматичної кризи та зменшення викидів вуглецю необхідні точні дані про викиди. У дослідженнях встановлено, що існуючі набори даних про викиди парникових газів часто є суперечливими і недостовірними, тому науковцями запропонований еталонний набір даних [21, 22]. Також дані є частковими, виокремленими. Разом з тим відсутня чітка координація між державними структурами на регіональному та державному рівнях.

Для оцінки вуглецевої нейтральності та впливу на довкілля методів видалення вуглекислого газу використовується оцінка життєвого циклу, для чого розроблено різні протоколи моніторингу, звітності

та верифікації парникових газів, що включає аналіз життєвого циклу та методи його оцінки [23]. Проте, відсутні у необхідному обсязі стандартизовані методики.

Не менш важливим і відкритим залишається питання стимулювання бізнесу щодо широкого запровадження системи моніторингу, звітності та верифікації парникових газів та кваліфікованих спеціалістів для ведення даного напряму.

Новизна. Запропоновано зміни у нормативно-законодавчу базу щодо Звіту оператора, визнаний за результатами верифікації, які узгоджуються з підходами, закріпленими у законодавстві Європейського Союзу.

Методологічне або загальнонаукове значення. Обґрунтування вдосконалення нормативно-законодавчої бази щодо визначення економічно обґрунтованих та реалістичних термінів для подання звітності, уточнення правил і графіку подання звітів про вдосконалення для операторів установок, ведення державної статистичної звітності має важливе значення для розробки політики нульової толерантності.

Викладення основного матеріалу. Відповідно до частини 6 статті 10 Закону Про засади моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів [4], встановлено граничний строк подання верифікованого звіту оператора до 31 березня року, наступного за звітним періодом. На практиці такий строк є нереалістичним для більшості суб'єктів господарювання, тому назріла нагальна потреба розробити законопроект про внесення змін до Закону, якою необхідно встановити реалістичні та обґрунтовані терміни подання звітності у сфері моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів операторами установок до уповноваженого органу, а також врегулювати порядок та строки подання звітів про вдосконалення. Для реалізації даного Закону розроблений Порядок здійснення моніторингу та звітності щодо викидів парникових газів [24].

Переважна частина державної статистичної звітності, яка є базою для формування звіту оператора, формується і подається до органів державної статистики до кінця лютого або початку березня наступного року за звітним (зокрема форми № 1П-НПП, № 4-мтп, № 11-мтп тощо). Так наприклад форма № 1П-НПП (річна) «Звіт про виробництво та реалізацію промислової продукції» згідно наказу Держстату від 24.03.2025 № 50 [25] подається не пізніше 28 лютого; форма № 4-мтп (річна) «Звіт про використання та запаси палива», не пізніше 28 лютого, наказ Держстату від 23.04.2024 № 133 [26]; форма № 11-мтп (річна) «Звіт про постачання та використання енергії», не пізніше 28 лютого, наказ Держстату від 24.04.2024 № 137 [27] та інші.

Відповідно, до цього моменту підприємства не володіють повним обсягом узагальнених даних щодо виробництва, споживання енергоресурсів та інших показників, необхідних для коректного розрахунку викидів парникових газів, як вимагає цього Закон та **не можуть надати верифікатору чи центральному органу влади достовірні та повні відомості.**

Крім того, річні показники обсягів викидів парникових газів об'єктивно можуть бути остаточно сформовані лише наприкінці січня року, наступного за звітним, після завершення внутрішніх процедур обліку, узагальнення первинних даних та отримання інформації від структурних підрозділів підприємств. Це суттєво обмежує час, доступний для проведення верифікації звітів.

Згідно листа Мінекономіки від 01.05.2026р. № 6702-08/41589-07 в Україні станом на 31.03.2026 в Єдиному реєстрі з моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів **зареєстровано 518 установок**. У цьому листі зазначено, що у наказах Мінекономіки станом на 31.03.2026 **є рішення щодо прийняття звітів операторів за звітний 2025 рік по 30 установках**. **Це становить всього лише 5,79% від загальної кількості установок**. Повної інформації щодо кількості звітів операторів за 2025 рік, які станом на 31.03.2026р. визнано задовільними за результатами верифікації, в розпорядженні Мінекономіки немає, оскільки продовжується опрацювання поданих до Мінекономіки звітів операторів, зазначено у листі.

У нафтогазовій галузі України через виснаженість більшості родовищ та зниження пластового тиску масово впроваджуються дотискні компресорні станції (ДКС). Оскільки номінальна теплова потужність деяких ДКС перевищує 20 МВт, вони підлягають обов'язковій реєстрації згідно з вимогами законодавства. Наразі в Єдиному реєстрі з моніторингу, звітності та верифікації (МЗВ) викидів парникових газів зареєстровано 34 установки підприємств Групи Нафтогаз, зокрема: АТ «Укргазвидобування» – 12 установок; АТ «Укртрансгаз» – 9 установок; АТ «Укрнафта» – 1 установка; ТОВ «Нафтогаз Тепло» – 2 установки; Теплові електростанції (в управлінні АТ «НАК «Нафтогаз України») – 9 установок. Станом на 31.03.2026 року через низку об'єктивних та суб'єктивних причин підприємства Групи Нафтогаз не подали до уповноваженого органу звіти оператора (що за результатами верифікації мають бути визнані задовільними) разом із верифікаційними звітами та відповідними заявами про їх прийняття.

Ситуація додатково ускладнюється обмеженою кількістю акредитованих органів з верифікації. На офіційному сайті Національного агентства акредитації України, розміщено інформацію про Перелік органів з верифікації, акредитованих на відповідність вимогам стандартів ДСТУ EN ISO/IEC 17029:2020 та ДСТУ EN ISO 14065:2022. [28]. Станом на 04.05.2026 р. у цьому Переліку є лише десять органів сертифікації.

Таким чином, десять органів сертифікації протягом одного місяця повинні провести верифікацію

Звітів операторів по 518 установках, приблизно по 50 установок на кожного. За наявної кількості установок та верифікаторів, на практиці вже вкотре доведено, що фізично неможливо забезпечити проведення якісної верифікації звітів у строк до 31 березня.

Також значний вплив має необхідність проведення процедур публічних закупівель послуг з верифікації, які можуть тривати декілька місяців і не завжди завершуються успішно з першого разу. На повторний запуск процедури додатково необхідно від 2 до 3 місяців, оскільки пакет документів на публікацію процедури необхідно підготувати заново.

Додатково слід враховувати значну кількість та географічну роззосередженість установок Оператора по території України. Організація та проведення виїзної верифікації вимагають значних часових витрат. Через це закупівля послуг через тендерні процедури, а також безпосереднє виконання верифікаційних заходів у стислі терміни (до 31 березня) є практично неможливими.

Ситуацію суттєво ускладнює військова агресія російської федерації. Внаслідок бойових дій низку установок Групи Нафтогаз, як і інших внесених до Єдиного реєстру суб'єктів господарювання, було частково пошкоджено або повністю знищено. Крім того, розташування об'єктів у прифронтовій зоні та постійні обстріли унеможливлюють безпечне проведення верифікації.

Наведені обставини призводять до системного порушення встановлених законодавством строків подання звітності з причин, що не залежать від операторів установок, та створюють ризики їх безпідставного притягнення до адміністративної відповідальності.

Відповідно до ст.91[6] Кодексу України про адміністративні правопорушення [29], порушення оператором установки вимог законодавства у сфері моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів:

– неподання звіту оператора, що за результатами верифікації визнано задовільним, та верифікаційного звіту в установленому законодавством порядку;

– надання верифікатору чи центральному органу завідомо недостовірних чи неповних відомостей, пов'язаних із здійсненням оператором моніторингу викидів парникових газів;

– тягнуть за собою накладення штрафу на фізичних осіб – підприємців **від ста до трьохсот неоподатковуваних мінімумів доходів громадян** і **на посадових осіб – від п'ятдесяти до вісімдесяти неоподатковуваних мінімумів доходів громадян.**

Повторне протягом року вчинення порушення, тягне за собою накладення штрафу на фізичних осіб – **підприємців від п'ятисот до тисячі неоподатковуваних мінімумів доходів громадян і на посадових осіб – від двохсот п'ятдесяти до чотирьохсот неоподатковуваних мінімумів доходів громадян з позбавленням права обіймати певні посади або займатися певною діяльністю строком на один рік»;**

Таким чином, станом на 31 березня 2026 р. орієнтовно 90% суб'єктів господарювання, як правило через об'єктивні не залежні від них причини, скоїли адміністративні правопорушення, і можуть бути притягнуті до відповідальності. **Але на час воєнного стану існує мораторій на проведення планових перевірок державною екологічною інспекцією, тому суб'єкти господарювання поки не притягаються до адміністративної відповідальності.**

Виконавчим Регламентом Комісії (ЄС) 2018/2066 від 19 грудня 2018 року щодо моніторингу та звітності про викиди парникових газів [30] відповідно до Директиви 2003/87/ЄС Європейського Парламенту та Ради [1] та внесення змін до Регламенту Комісії (ЄС) № 601/2012 [31], у статті 68 зазначено, що **Оператор повинен подати компетентному органу до 31 березня кожного року звіт про викиди**, який охоплює річні викиди за звітний період та який перевірений відповідно до Імплементаційного регламенту (ЄС) 2018/2067. При цьому у ст.69 Звітування про вдосконалення методології моніторингу, цього ж Регламенту, зазначається, що Оператор установки повинен подати компетентному органу на затвердження звіт **до 30 червня**. Однак **компетентний орган може встановити альтернативну дату подання звіту**, **але не пізніше 30 вересня** того ж року.

У зв'язку з цим нами було напрацьовано проект змін до Закону, яким пропонується внести такі зміни:

1. Перший абзац частини шостої статті 10 викласти у такій редакції:

"**6. Звіт оператора, визнаний за результатами верифікації задовільним, подається до уповноваженого органу разом з верифікаційним звітом та заявою про прийняття звіту оператора не пізніше 30 червня року, наступного за звітним періодом.**";

2. Додати частину 6^1 у такій редакції:

6^1. Звіт про вдосконалення подається для затвердження уповноваженим органом разом із заявою у такі строки:

для установок категорії А – до 30 вересня кожні чотири роки;

для установок категорії Б – до 30 вересня кожні два роки;

для установок категорії В – щороку до 30 вересня.

Якщо верифікаційний звіт зазначає невідповідності звіту оператора, що не були виправлені, та містить рекомендації щодо вдосконалення, оператор подає уповноваженому органу звіт про вдосконалення до 30 вересня року, в якому верифікаційний звіт був наданий верифікатором, а під час воєнного стану – до 30 грудня цього самого року.

Якщо оператор вважає, що рекомендовані верифікатором заходи із вдосконалення не призведуть до вдосконалення методики моніторингу або призве-

дуть до необґрунтованих витрат, оператор зобов'язаний навести відповідне обґрунтування у звіті про вдосконалення.

Оператори установок з низькими обсягами викидів парникових газів та простих установок не подають для затвердження уповноваженим органом звіт про вдосконалення, якщо верифікаційний звіт містить лише рекомендації щодо вдосконалення.

Висновки. У статті здійснено комплексний аналіз теоретико-правових та прикладних аспектів функціонування системи моніторингу, звітності та верифікації (МЗВ) викидів парникових газів в Україні після відновлення її обов'язковості з 1 лютого 2025 року. За результатами дослідження сформульовано такі основні висновки:

Виявлено критичну часову та логістичну колізію. Встановлений законодавством граничний строк подання верифікованого звіту оператора (до 31 березня) є практично нереалістичним для більшості підприємств. Головними деструктивними чинниками є тривале формування базової державної статистичної звітності (до кінця лютого), довготривалі процедури тендерних закупівель верифікаційних послуг, а також значна географічна роззосередженість об'єктів.

Констатовано інфраструктурний дефіцит системи верифікації. Станом на першу половину 2026 року в Україні зареєстровано 518 промислових установок, тоді як акредитацію мають лише 10 органів сертифікації. Таке співвідношення (близько 50 об'єктів на один орган) унеможливлює проведення якісного екологічного аудиту у стислі нормативні строки, що підтверджується критично низьким відсотком ухвалених звітів за минулий період (менше 6%).

Визначено галузеву специфіку ризиків (на прикладі нафтогазової галузі України). Через природне виснаження родовищ та падіння пластового тиску підприємства Групи Нафтогаз змушені масово впроваджувати дотискні компресорні станції (ДКС) потужністю понад 20 МВт, які автоматично стають суб'єктами регулювання МЗВ. Ситуація для них погіршується руйнуваннями внаслідок військової агресії рф та ризиками безпеки під час виїзного аудиту у прифронтових зонах.

Обґрунтовано невідповідність каральних механізмів реальним умовам. Жорсткі часові обмеження створюють штучні передумови для масового безпідставного притягнення бізнесу до адміністративної відповідальності (за ст. 91-6 КУпАП) через чинники форс-мажорного характеру. Наявний на період воєнного стану мораторій на екологічні перевірки лише тимчасово нівелює цю загрозу, але не розв'язує системну правову проблему.

Запропоновано шляхи законодавчої оптимізації та євроінтеграції. Для гармонізації національного права із Виконавчим Регламентом Комісії (ЄС) 2018/2066 розроблено конкретні пропозиції змін до Закону України про МЗВ. Рекомендовано перенести кінцевий строк подання верифікованого звіту на 30 червня. Також запропоновано диференціювати терміни звітування про вдосконалення методології залежно від категорії установок (А, Б, В) до 30 вересня та повністю звільнити від цього обов'язку малі установки з низькими обсягами викидів. Реалізація цих змін дозволить знизити регуляторний тиск на бізнес, підвищити якість екологічних даних та забезпечить сталий перехід до національної системи торгівлі квотами.

Література

1. Про встановлення системи торгівлі квотами на викиди парникових газів у межах Союз : Директива Європейського Парламенту та Ради 2003/87/ЄС від 13 жовтня 2003 р. URL : https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2003/87/oj.
2. Amending Directive 2003/87/EC establishing a scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the Community, in respect of the Kyoto Protocol's project mechanisms : Directive 2004/101/ec of the European Parliament and of the Council of 27 October 2004. URL : https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2004/101/oj/eng.
3. Кіотський протокол до Рамкової конвенції Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату : Протокол від 04 лютого 2004 р. № 1430-IV (1430-15). URL : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_801#Text.
4. Про засади моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів : Закон України від 12 грудня 2019 р. № 377-IX. URL : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/377-20#Text.
5. Про захист інтересів суб'єктів подання звітності та інших документів у період дії воєнного стану або стану війни : Закон України від 03 березня 2022 р. № 2115-IX. URL : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2115-20#Text.
6. Стратегія екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату на період до 2030 року : Розпорядження КМУ від 20 жовтня 2021 р. № 1363-р. URL : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1363-2021-%D1%80#Text.
7. План заходів щодо створення національної системи торгівлі квотами на викиди парникових газів : Розпорядження КМУ від 21 лютого 2025 р. № 146-р. URL : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/146-2025-%D1%80#Text.
8. Заруба Д. В., Бойко О. П., Герасименко О. М., Литвиненко В. О., Стефківський В.М., Федоренко О.В. Перспективи впровадження в Україні системи моніторингу звітності та верифікації викидів нормативних газів у атмосферу та шляхи їх скорочення. *Екологічні науки*. 2022. № 1(40). С. 67-70. URL : https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.1-40.12.
9. Краковська С., Букша І., Волошенюк О. Парникові гази на торфовищах: моніторинг, звітність та верифікація : науково-методичні рекомендації. Київ, 2026. С. 71. URL : https://surl.lt/nntxxz.
10. Кірейцева, Г., Хоменко, С. (2025). Впровадження системи моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів як інструмент євроінтеграції України. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського.* 2025. Вип. 1(150). С. 81-91. URL : https://doi.org/10.32782/1995-0519.2025.1.10.

11. Струк Н. С., Демко Р. Р. Обліково-аналітичне забезпечення формування звітності зі сталого розвитку підприємств. *Український економічний часопис*, 2025, № 10. С. 110-116. URL : https://doi.org/10.32782/2786-8273/2025-10-17.
12. Про ратифікацію Рамкової конвенції Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату : Закон України від 29 жовтня 1996 р. № 435/96-ВР / Верховна Рада України. *Відомості Верховної Ради України*, 1996. № 50. Ст. 277. URL : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_044#Text.
13. Паризька угода : Закон України від 14 липня 2016 р № 1469-VIII / ВР / Верховна Рада України. *Відомості Верховної Ради України*. 2016. № 35. Ст. 595) URL : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1469-19#n2.
14. Deswal S., Deswal P. Sustainability: Greenhouse Gas Protocol and global GHG emissions' status and trends'. *International Journal of Multidisciplinary Research and Growth Evaluation*, 2025. № 6(1), 2051-2063. URL : https://doi.org/10.54660/.IJMRGE.2025.6.1.2051-2063.
15. Sharaf-Addin H. H., Al-Dhubaibi A. A. S. Carbon sustainability reporting based on GHG protocol framework: A Malaysian practice towards net-zero carbon emissions. *Environmental and Sustainability Indicators*, 2025. 25, 100588. URL : https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100588.
16. Лабенко, О. М., Самойлик, Ю. В. Обґрунтування сценаріїв скорочення викидів як інструмент оптимізації фінансових стимулів у системі управління відходами. *Науковий погляд: економіка та управління.* 2025. № 1 (89). С. 54-61. URL : https://doi.org/10.32782/2521-666X/2025-89-7.
17. 95% of World's Top 250 Companies Now Publishing Carbon Targets: KPMG Report. URL : https://esgnews.com/95-of-worlds-top-250-companies-now-publishing-carbon-targets-kpmg-report/?utm_source
18. Чміль Є.Л. Обліково-аналітичне забезпечення управління інноваційним розвитком підприємства : дис. … ступеня доктора філософії : 071. Харків. 2026. 323 с. URL : https://biotechuniv.edu.ua/wp-content/uploads/2026/06/chmil-dys.pdf
19. Jenkins J. G., Negangard E. M., Sheldon M. D. Using blockchain, non-fungible tokens, and smart contracts to track and report greenhouse gas emissions. *The Accounting Review*. 2025. 100(3), 277-305. URL : https://doi.org/10.2308/TAR-2023-0222.
20. Körner M. F., Leinauer C., Ströher T., & Strüker, J. Digital Measuring, Reporting, and Verification (dMRV) for Decarbonization. *Business & Information Systems Engineering*. 2025. 67(5), 753-765. URL : https://doi.org/10.1007/s12599-025-00953-3.
21. Beck J., Steinberg A., Dimmelmeier A., Domenech Burin L., Kormanyos E., Fehr M., Schierholz M. Addressing data gaps in sustainability reporting: A benchmark dataset for greenhouse gas emission extraction. *Scientific Data* 2025.12(1). 1497. URL : https://www.nature.com/articles/s41597-025-05664-8.
22. Найбільш поширені питання у сфері моніторингу, звітності та верифікації щодо викидів ПГ в Україні. 2023. URL : https://surl.li/hkvcpg.
23. Ya, Y., Zhang B. Life cycle assessment in the monitoring, reporting, and verification of land-based carbon dioxide removal: gaps and opportunities. *Environmental science & technology*. 2025. 59(24). 11950-11963. URL : https://doi.org/10.1021/acs.est.4c09510.
24. Про затвердження Порядку здійснення моніторингу та звітності щодо викидів парникових газів : Постанова КМУ від 23 вересня 2020 р. № 960. URL : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/960-2020-%D0%BF#Text.
25. Про затвердження форми державного статистичного спостереження № 1П-НПП (річна) «Звіт про виробництво та реалізацію промислової продукції» : Наказ державної служба статистики України від 24.03.2025 № 50. URL : https://stat.gov.ua/uk/page-contents/nakaz-vid-24032025-no50.
26. Про затвердження форм державного статистичного спостереження № 4-мтп (місячна) «Звіт про використання та запаси палива» та № 4-мтп (річна) «Звіт про використання та запаси палива» : Наказ державної служба статистики України від 23.04.2024 № 133. URL : https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0133832-24#Text.
27. Про затвердження форми державного статистичного спостереження № 11-мтп (річна) «Звіт про постачання та використання енергії» : Наказ державної служба статистики України від 24.04.2024 № 137. URL : https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0137832-24#Text.
28. Реєстр акредитованих ООВ. URL : https://naau.org.ua/3-reiestr-akreditovanikh-oov.
29. Кодекс України про адміністративні правопорушення. URL : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/8073-10#Text.
30. Про верифікацію даних і акредитацію верифікаторів згідно з Директивою Європейського Парламенту і Ради 2003/87/ЄС : Імплементаційний Регламент Комісії (ЄС) 2018/2067 від 19 грудня 2018 року. URL : https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R2066.
31. Про моніторинг викидів парникових газів та звітування про них відповідно до Директиви Європейського Парламенту і Ради 2003/87/ЄС : Регламент Комісії (ЄС) № 601/2012 від 21 червня 2012 року URL : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_020-12#Text.

Дата першого надходження статті до видання: 27.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

УДК 598.2:620.9
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.7

ПРОСТОРОВО-ЧАСОВА ДИФЕРЕНЦІАЦІЯ РИЗИКУ ЗІТКНЕНЬ ПТАХІВ ІЗ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИМИ УСТАНОВКАМИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ CRM-МОДЕЛЮВАННЯ

Ковган Я.О. (orcid.org/0009-0000-7691-7833)
Герасименко М.В. (orcid.org/0009-0009-9991-1106)
Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»
вул. Василя Липківського, 35/2, 02000, Київ
erdu@urk.net

Вивчено вплив вітроенергетичних установок на орнітофауну, зокрема ризику зіткнення птахів із лопатями ротора. Особливої актуальності ця проблема набуває в гірських екосистемах, де орографічні особливості, висхідні повітряні потоки та просторово-часова структура міграцій визначають характер використання повітряного простору птахами.

Метою дослідження було визначення потенційного рівня колізійного ризику для хижих птахів у зоні розміщення проєктованої вітроенергетичної установки. Розрахунки виконано із застосуванням Collision Risk Model (CRM) для двох режимів польотної активності «normal approach» та «birds on migration» із використанням чотирьох сценаріїв поведінкового уникнення: 95, 98, 99 та 99,5 %.

За сценарієм «normal approach» найбільший потенційний ризик встановлено для канюка звичайного (*Buteo buteo* Linnaeus, 1758): за прогнозованої кількості 195 перетинів площини ротора на рік базова частота потенційних зіткнень становила 10 випадків на рік. Врахування поведінкового уникнення зменшувало цей показник до 0,5 випадку за коефіцієнта 95 %, 0,2 – за 98 % та 0,1 – за 99 і 99,5 %. За сценарієм «birds on migration» найбільшу кількість прогнозованих перетинів площини ротора отримано для канюка звичайного 55 ос./рік, луня очеретяного (*Circus aeruginosus* Linnaeus, 1758) – 30 ос./рік, яструба малого (Accipiter nisus Linnaeus, 1758) – 23 ос./рік та боривітра звичайного (*Falco tinnunculus* Linnaeus, 1758) – 14 ос./рік. Після врахування поведінкового уникнення прогнозована частота зіткнень для більшості видів не перевищувала 0,2 випадку на рік.

Результати свідчать про прогнозований рівень прямого колізійного ризику за прийнятих параметрів моделі. Водночас встановлено залежність результатів CRM від просторово-часової структури польотів та коефіцієнта уникнення. Для гірських екосистем обґрунтовано доцільність доповнення CRM просторовими, орографічними, метеорологічними та поведінковими параметрами з подальшою інтеграцією результатів у багаторівневу просторово-часову модель колізійного ризику. *Ключові слова:* вітроенергетика, вітроенергетична установка, хижі птахи, колізійний ризик, Collision Risk Model, поведінкове уникнення, міграція, гірські екосистеми, просторово-часове моделювання.

Spatiotemporal Differentiation Of Bird Collision Risk With Wind Turbines Using Collision Risk Modeling. Kovhan Ya., Herasymenko M.

The development of wind energy requires quantitative assessment of the potential effects of wind turbines on avifauna, particularly the risk of bird collisions with rotor blades. This issue is especially relevant in mountain ecosystems, where topographic features, updrafts, and the spatiotemporal structure of migration determine how birds use the aerial environment.

The aim of this study was to determine the potential collision risk for raptors in the area of a proposed wind turbine. Calculations were performed using the Collision Risk Model (CRM) for two flight-activity scenarios, “normal approach” and “birds on migration”, with four avoidance-rate scenarios: 95, 98, 99, and 99.5%.

Under the “normal approach” scenario, the highest potential risk was estimated for the Common Buzzard (Buteo buteo): with a predicted 195 rotor-plane crossings per year, the baseline collision frequency was 10 collisions per year. Accounting for behavioural avoidance reduced this value to 0.5 collisions at a 95% avoidance rate, 0.2 at 98%, and 0.1 at both 99 and 99.5%. Under the “birds on migration” scenario, the highest numbers of predicted rotor-plane crossings were obtained for the Common Buzzard (55 individuals/year), Western Marsh Harrier (*Circus aeruginosus*) (30), Eurasian Sparrowhawk (*Accipiter nisus*) (23), and Common Kestrel (*Falco tinnunculus*) (14). After accounting for behavioural avoidance, the predicted collision frequency did not exceed 0.2 collisions per year for most species.

The results indicate a low predicted level of direct collision risk under the adopted model parameters. At the same time, CRM results were found to depend on the spatiotemporal structure of flight activity and the assumed avoidance rate. For mountain ecosystems, the results support the integration of CRM with spatial, topographic, meteorological, and behavioural parameters, followed by incorporation of CRM outputs into a multilevel spatiotemporal collision-risk model. *Key words:* wind energy, wind turbine, raptors, collision risk, Collision Risk Model, behavioural avoidance, migration, mountain ecosystems, spatiotemporal modelling.

© Ковган Я.О., Герасименко М.В., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Вступ. Розширення використання відновлюваних джерел енергії є одним із важливих напрямів трансформації енергетичних систем. Водночас розвиток вітроенергетики потребує врахування потенційного впливу вітроенергетичних установок (ВЕУ) на біорізноманіття. Одним із ключових механізмів такого впливу є зіткнення птахів із конструктивними елементами турбін, насамперед із лопатями ротора. Ризик зіткнення формується внаслідок взаємодії видових, просторових, метеорологічних та технічних чинників і не може бути адекватно охарактеризований лише чисельністю птахів на території [1, 2].

До основних факторів, пов'язаних із колізійним ризиком, належать чисельність та поведінка птахів, морфологічні характеристики виду, висота і траєкторія польоту, особливості використання території, характеристики ландшафту, метеорологічні умови, а також конструктивні параметри та просторове розташування ВЕУ [2]. Таким чином, високий ризик зіткнення формується не одним фактором, а їх поєднанням.

Особливого значення ці закономірності набувають у гірських екосистемах. Рельєф визначає структуру повітряних потоків і може створювати умови для використання птахами орографічного підйому та ширяння. Просторові характеристики ландшафту пов'язані з розподілом зон, сприятливих для висхідного руху повітря, що, своєю чергою, може впливати на траєкторії переміщення ширяючих птахів [3]. Атмосферні умови також здатні змінювати напрямок, швидкість і просторову структуру міграційних переміщень [4]. Тому в гірських районах навіть відносно невелика територія може характеризуватися значною просторовою неоднорідністю польотної активності та, відповідно, колізійного ризику.

Одним із найбільш поширених інструментів кількісного прогнозування потенційних зіткнень є Collision Risk Model (CRM), методологічна основа якого була сформована в роботах Band та співавторів [5, 6]. CRM передбачає послідовний розрахунок кількості пташиних польотів через площу ротора, геометричної ймовірності зіткнення та очікуваної кількості зіткнень із подальшим урахуванням поведінкового уникнення. Сучасна методика NatureScot розглядає CRM як стандартизований інструмент кількісного прогнозування колізійного ризику для наземних вітрових електростанцій [7, 8].

Водночас CRM не є універсальним показником фактичної смертності. Результат моделі залежить від якості польових спостережень, характеристики польотної активності та висоти польоту, параметрів ВЕУ, припущень щодо поведінки птахів і прийнятого коефіцієнта уникнення. Огляд Masden і Cook [9] показав, що CRM є інформативним інструментом, але характеризується значною залежністю від вихідних даних та модельних припущень. У сучасній методиці також наголошується на необхідності врахування невизначеності параметрів моделі та відповідності обраних коефіцієнтів уникнення конкретним умовам і видам [8].

Отже, актуальним є не лише визначення абсолютної прогнозованої кількості зіткнень, а й аналіз її просторово-часової та видової структури, а також чутливості результатів до зміни параметрів поведінкового уникнення.

Метою дослідження було проаналізувати результати CRM-моделювання потенційного ризику зіткнень птахів із ВЕУ за різних режимів польотної активності та сценаріїв поведінкового уникнення, а також визначити чинники, що обумовлюють просторово-часову диференціацію ризику в умовах гірської екосистеми.

Матеріали та методи. Вихідною інформацією для моделювання були результати польових орнітологічних досліджень, проведених на території проєктованого розміщення вітрової електростанції. Для розрахунків використано дані щодо видового складу, чисельності, висоти та просторової активності птахів. До аналізу включено види, польоти яких реєструвалися в межах висотного діапазону, відповідного робочій зоні ротора ВЕУ, – 34-216 м.

У моделюванні враховували чисельність птахів, частоту та інтенсивність польотів, висоту польоту, частку польотів у межах робочого діапазону ротора, прогнозовану кількість перетинів площини ротора, конструктивні параметри ВЕУ та поведінкове уникнення.

CRM концептуально передбачає послідовний перехід від кількості польотів через площу ротора до ймовірності зіткнення одного птаха під час перетину площі ротора і, відповідно, до очікуваної кількості зіткнень за певний період [6, 7]. Важливою складовою моделі є врахування поведінкового уникнення, оскільки птахи можуть змінювати напрямок або висоту польоту при наближенні до ВЕУ [8].

Для інтерпретації результатів розрізняли:

– базову частоту потенційних зіткнень – розрахунок до врахування поведінкового уникнення;

– прогнозовану частоту зіткнень – результат після застосування відповідного коефіцієнта уникнення.

Такий підхід відповідає структурі CRM, у якій розрахунок ймовірності зіткнення передує коригуванню результату на поведінкове уникнення [6-8].

Для аналізу чутливості результатів використано чотири сценарії поведінкового уникнення: 95, 98, 99 та 99,5 %. Ці значення використано саме як сценарний діапазон для перевірки чутливості моделі, а не як універсальні видові коефіцієнти. Така постановка є принципово важливою, оскільки сучасні рекомендації підкреслюють необхідність обґрунтованого вибору avoidance rate з урахуванням виду та умов дослідження [8].

Аналіз проведено окремо для двох режимів польотної активності:

«normal approach» – звичайної локальної польотної активності;

«birds on migration» – транзитних міграційних переміщень.

Результати дослідження. *Результати CRM за сценарієм «normal approach»*. За умов звичайної локальної польотної активності найбільшу кількість потенційних перетинів площини ротора встановлено для канюка звичайного (*Buteo buteo* Linnaeus, 1758) – 195 ос./рік. Для цього виду базова частота потенційних зіткнень без урахування поведінкового уникнення становила 10 випадків на рік.

Для інших видів показники були істотно нижчими. Яструб малий (*Accipiter nisus* Linnaeus, 1758) мав два прогнозованих перетини площини ротора на рік, осоїд (*Pernis apivorus* Linnaeus, 1758) – один, лунь очеретяний (*Circus aeruginosus* Linnaeus, 1758) – чотири, лунь лучний (*Circus pygargus* Linnaeus, 1758) – один, підсоколик великий (*Falco subbuteo* Linnaeus, 1758) – один, боривітер звичайний (*Falco tinnunculus* Linnaeus, 1758) – п'ять. Для яструба великого (*Accipiter gentilis* Linnaeus, 1758), зимняка (*Buteo lagopus* Pontoppidan, 1763), луня польового (*Circus cyaneus* Linnaeus, 1766), луня степового (*Circus macrourus* S. G. Gmelin, 1771) та змієїда (*Circaetus gallicus* Gmelin, 1788) потенційні перетини не були зафіксовані. Після врахування поведінкового уникнення прогнозована частота зіткнень для канюка звичайного становила:

Коефіцієнт уникнення	Очікувана кількість зіткнень, ос./рік
95 %	0,5
98 %	0,2
99 %	0,1
99,5 %	0,1

Таким чином, застосування поведінкового коефіцієнта призвело до істотного зменшення прогнозованої частоти зіткнень. Для інших досліджених видів прогнозовані значення за всіма сценаріями були нульовими або наближалися до нульового рівня.

Канюк звичайний формував основну частину розрахункового ризику за сценарію «normal approach». Така закономірність може бути пов'язана з особливостями просторового використання території та характером польотної активності виду. Відомо, що характеристики виду, ландшафту та вітрової електростанції взаємодіють у формуванні ризику зіткнень [2]. Для ширяючих птахів важливе значення також мають доступність висхідних потоків і просторове розташування орографічних структур [3].

Результати CRM за сценарієм «birds on migration». За міграційного сценарію структура потенційного ризику була дещо іншою. Найбільшу кількість прогнозованих перетинів площини ротора отримано для канюка звичайного – 55 ос./рік, луня очеретяного – 30, яструба малого – 23, боривітра звичайного – 14, осоїда – 10 та луня лучного – 10 ос./рік.

Без урахування поведінкового уникнення максимальна частота потенційних зіткнень становила 3 випадки на рік для канюка звичайного, 2 – для луня очеретяного та по 1 випадку – для яструба малого і боривітра звичайного.

Після врахування поведінкового уникнення для канюка звичайного прогнозована кількість зіткнень становила 0,2 випадку на рік за 95 % уникнення та 0,1 випадку за 98 %. За сценаріїв 99 і 99,5 % результат округлювався до нуля. Для луня очеретяного та яструба малого за 95 % уникнення прогнозована частота становила близько 0,1 випадку на рік, тоді як за вищих коефіцієнтів уникнення наближалася до нуля.

Отже, збільшення кількості транзитних перетинів площини ротора в міграційний період не супроводжувалося пропорційним збільшенням прогнозованої кількості зіткнень після врахування поведінкового уникнення.

Обговорення. Отримані результати демонструють виражену видову неоднорідність потенційного колізійного ризику. Основна частина прогнозованого ризику припадала на канюка звичайного. Це узгоджується із загальним положенням про те, що ризик зіткнення формується комплексом видових, просторових та технічних факторів, а не визначається лише чисельністю птахів [2].

Для гірських територій особливого значення набуває просторове розташування зон висхідних потоків. Дослідження Scacco et al. [3] показало, що статичні ландшафтні характеристики можуть бути предикторами розташування зон підйому, які використовуються ширяючими птахами. Атмосферні умови, своєю чергою, можуть істотно змінювати траєкторії та просторову організацію міграційних переміщень [4]. Тому однакова середня інтенсивність польотів може відповідати різним просторовим конфігураціям ризику.

Одним із найбільш важливих результатів моделювання є суттєве зниження прогнозованої кількості зіткнень після введення коефіцієнта уникнення. Для канюка звичайного за локального сценарію перехід від 10 потенційних зіткнень до 0,5 за 95 % уникнення означає приблизно 20-кратне зменшення прогнозованого показника. За 98 % уникнення він зменшується приблизно у 50 разів, до 0,2 випадку на рік.

Цей результат демонструє високу чутливість CRM до параметра поведінкового уникнення. Саме тому avoidance rate не слід розглядати як другорядний технічний коефіцієнт. У сучасному CRM він є одним із ключових параметрів, що переводить теоретичну ймовірність зіткнення у прогнозовану кількість зіткнень [8].

Водночас застосування одного фіксованого коефіцієнта для різних видів може спрощувати реальну поведінкову реакцію. У сучасних рекомендаціях NatureScot підкреслюється необхідність обґрунту-

вання avoidance rate та його відповідності конкретному виду й умовам оцінювання [8]. Тому використання у цьому дослідженні чотирьох сценаріїв доцільно розглядати передусім як аналіз чутливості результату до поведінкового параметра.

Порівняння «normal approach» та «birds on migration» показало зміну структури ризику в міграційний період. Збільшення кількості видів і особин, які потенційно перетинають площину ротора, відображає підвищення інтенсивності транзитних переміщень. Однак після врахування поведінкового уникнення прогнозована кількість зіткнень залишалася низькою. Це підтверджує, що інтенсивність польотного потоку і колізійний ризик є взаємопов'язаними, але не тотожними характеристиками.

Разом із тим отримані результати не слід інтерпретувати як доказ відсутності екологічно значущого впливу ВЕУ. CRM прогнозує насамперед ризик прямого зіткнення, тоді як функціонування вітрових електростанцій може також спричиняти уникнення території, бар'єрний ефект, зміни використання середовища та інші поведінкові реакції [2, 7].

Крім того, прогнозована кількість зіткнень не є автоматично еквівалентною популяційно значущій смертності. Сучасні методичні рекомендації наголошують, що кількісний прогноз CRM має бути співвіднесений із відповідними популяціями та значущістю потенційного впливу [7, 8]. Тому твердження про відсутність впливу на локальні популяції потребувало б додаткового демографічного аналізу.

Ще одним обмеженням є залежність CRM від якості польових даних. Masden і Cook [9] показали, що сучасні CRM можуть бути «data hungry» та містити суттєві припущення щодо руху і поведінки птахів. У методиці Band [6, 7] окремо враховуються польотна активність, висота польоту, характеристики турбін, час роботи ВЕУ та avoidance rate. Отже, репрезентативність польових спостережень є критично важливою для достовірності прогнозу.

Для гірських екосистем ця проблема посилюється просторовою неоднорідністю повітряного простору. Усереднені показники польотної активності можуть приховувати локальні зони концентрації птахів поблизу вододілів, схилів, перевалів або інших орографічних структур.

У зв'язку з цим результати дослідження обґрунтовують необхідність переходу від простого просторово усередненого CRM до просторово-часової диференціації колізійного ризику. До інтегрованої моделі доцільно включати щонайменше п'ять груп змінних:

– орнітологічні – чисельність, видовий склад, частота та висота польотів;

– просторові – рельєф, відстань до ВЕУ, положення вододілів, схилів та міграційних коридорів;

– метеорологічні – швидкість і напрямок вітру, температура, атмосферні умови та характеристики висхідних потоків;

– технічні – висота маточини, діаметр ротора, робочий діапазон висот і просторове розташування турбін;

– часові – сезон, період доби та фаза міграції.

Таким чином, CRM у запропонованому підході розглядається як базовий кількісний компонент, а не як кінцева характеристика загального екологічного ризику. Концептуально інтеграцію можна представити як: польові орнітологічні дані → параметризація CRM → базовий колізійний ризик → просторово-часова диференціація → урахування орографічних, метеорологічних і поведінкових чинників → інтегральна характеристика ризику.

Такий підхід відповідає сучасному напрямові розвитку CRM, спрямованому на підвищення прозорості розрахунків, врахування невизначеності та кращу просторову репрезентативність прогнозів [7-9].

Висновки. CRM-моделювання показало низький прогнозований рівень прямого колізійного ризику для більшості досліджених видів хижих птахів. За сценарію «normal approach» найбільший внесок у ризик мав канюк звичайний (*Buteo buteo*): за 195 потенційних перетинів площини ротора на рік базова частота зіткнень становила 10 випадків, а після врахування поведінкового уникнення знижувалася до 0,5-0,1 випадку на рік.

За сценарію «birds on migration» найбільшу кількість потенційних перетинів встановлено для канюка звичайного, луня очеретяного, яструба малого та боривітра звичайного. Після врахування поведінкового уникнення прогнозована частота зіткнень для більшості видів наближалася до нульового рівня.

Встановлено високу чутливість результатів CRM до коефіцієнта поведінкового уникнення, що обґрунтовує використання сценарного підходу замість інтерпретації одного фіксованого значення.

Для гірських екосистем колізійний ризик має просторово-часову неоднорідність і формується взаємодією рельєфу, орографічних повітряних потоків, міграційних переміщень, висоти польоту та поведінкових реакцій птахів.

Класичний CRM є ефективним інструментом прогнозування прямого колізійного ризику, однак його результати не охоплюють усі компоненти екологічного впливу ВЕУ. Перспективним напрямом є інтеграція CRM із GIS-, дистанційними, метеорологічними та поведінковими даними у багаторівневу просторово-часову модель із подальшою емпіричною перевіркою прогнозів за результатами операційного моніторингу.

Під час підготовки рукопису використано інструменти генеративного штучного інтелекту для мовного редагування, удосконалення структури тексту та формулювання окремих положень. Наукова інтерпретація результатів, перевірка фактичних даних, вибір методів дослідження, розрахунки та відповідальність за зміст статті належать авторам.

Література

1. Band W. Windfarms and birds: calculating a theoretical collision risk assuming no avoiding action. Scottish Natural Heritage Guidance Note. Battleby : Scottish Natural Heritage, 2000. 10 p.
2. Band W., Madders M., Whitfield D. P. Developing field and analytical methods to assess avian collision risk at wind farms. Birds and Wind Power: Risk Assessment and Mitigation / eds. M. de Lucas, G. F. E. Janss, M. Ferrer. Madrid : Quercus, 2007. P. 259–275.
3. Band W. Using a collision risk model to assess bird collision risks for onshore wind farms. NatureScot Research Report 909. Edinburgh : NatureScot, 2024.
4. Masden E. A., Cook A. S. C. P. Avian collision risk models for wind energy impact assessments. Environmental Impact Assessment Review. 2016. Vol. 56. P. 43-49. DOI: 10.1016/j.eiar.2015.09.001.
5. Marques A., Batalha H., Rodrigues S. et al. Understanding bird collisions at wind farms: an updated review on the causes and possible mitigation strategies. Biological Conservation. 2014. Vol. 179. P. 40-52. DOI: 10.1016/j.biocon.2014.08.017.
6. Drewitt A. L., Langston R. H. W. Assessing the impacts of wind farms on birds. Ibis. 2006. Vol. 148, Suppl. 1. P. 29-42. DOI: 10.1111/j.1474-919X.2006.00516.x.
7. Barrios L., Rodríguez A. Behavioural and environmental correlates of soaring-bird mortality at on-shore wind turbines. Journal of Applied Ecology. 2004. Vol. 41, No. 1. P. 72–81. DOI: 10.1111/j.1365-2664.2004.00876.x.
8. Thaxter C. B., Buchanan G. M., Carr J. et al. Bird and bat species' global vulnerability to collision mortality at wind farms revealed through a trait-based assessment. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences. 2017. Vol. 284, No. 1862. Art. 20170829. DOI: 10.1098/rspb.2017.0829.
9. Shamoun-Baranes J., Liechti F., Vansteelant W. M. G. Atmospheric conditions create freeways, detours and tailbacks for migrating birds. Journal of Comparative Physiology A. 2017. Vol. 203. P. 509–529. DOI: 10.1007/s00359-017-1181-9.
10. Scacco M., Flack A., Duriez O., Wikelski M., Safi K. Static landscape features predict uplift locations for soaring birds across Europe. Royal Society Open Science. 2019. Vol. 6, No. 1. Art. 181440. DOI: 10.1098/rsos.181440.
11. NatureScot. Wind farm impacts on birds: use of avoidance rates in the NatureScot Wind Farm Collision Risk Model. Updated September 2025. Edinburgh : NatureScot, 2025.

Дата першого надходження статті до видання: 24.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

УДК 613.6
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.8

ФІТОРЕВІТАЛІЗАЦІЯ У СИСТЕМІ ЕКОЛОГОЦЕНТРИЧНИХ ЗАХОДІВ ВІДНОВЛЕННЯ ПОРУШЕНИХ ТЕРИТОРІЙ

Литвин Б.Б. (orcid.org/0009-0007-8405-7555),
Смірнов О.Є. (orcid.org/0000-0002-2293-5961),
Таран Н.Ю. (orcid.org/0000-0002-8669-5899)
Навчально-науковий центр «Інститут біології та медицини»
Київського національного університету імені Тараса Шевченка
пр. Академіка Глушкова, 2, 02000, Київ
lytvynbogdan164@gmail.com, oleksandr.smirnov@knu.ua, nataliya.taran@knu.ua

Актуальність та мета дослідження. Відновлення територій, понівечених внаслідок воєнних дій чи антропогенного забруднення – це довгий і дороговартісний процес, який вимагає тривалого економічного і екологічного дослідження, яке має встановити метод очищення, подальше облаштування ділянки і цільове призначення для майбутньої експлуатації. Щоб зробити цей процес ефективним і стандартизованим, необхідно дослідити взаємозв'язок між екологічною цілісністю території, економічною привабливістю та відповідністю заходам, спрямованням на адаптацію до кліматичних змін. Світова наукова думка зосередженна на розв'язанні широкого кола екологічних і кліматичних проблем за допомогою концепції природоорієнтованих рішень (nature-based solutions), базованих, зокрема на процесах "фіторевіталізації" – комплексі заходів з відновлення територій завдяки впливу на стан екоценозу з використанням рослин як головного інструменту відновлення і важливого ресурсу в подальшій бізнес складовій. Мета – релевантний аналіз комплексу фіторевіталізаційних заходів та їх екологічна актуальність в проектах з відновлення постраждалих регіонів та створенні нових бізнес проектів. Матеріали та методи. Методи пошуку інформації в друкованих та електронних виданнях, пошукових наукових базах даних, а також методи аналізу, порівняння та узагальнення. Результати. Наведено приклади використання фіторемедіації у світі та описано потенційні перспективи застосування цього підходу на українських територіях після військового протистояння для пост-відновлення. Розглянуто методи ревіталізаційних заходів у системі грунт-рослина та їхній кліматоформуючій функції для проектування екологічно збалансованих просторів та економічну перспективність відновлених територій. Обгрунтована потреба в подальших дослідженнях і розробці національних програм з використання фіторевіталізаційних технологій у повоенному відновленні країни. Висновки. Фіторевіталізація є мультиваріантним процесом поєднання різних галузей екології та економіки, яка націлена на розвиток територій, поневічених війною та промисловим впливом, використовуючи рослини як основний інструмент відновлення і головна кліматорегулююча складова сталого розвитку. Даний підхід ставить на меті створення нових робочих місць, доданої вартості та нових ресурсних джерел для розвитку громад і країни в екологічно сталому напрямку, який буде вигідним для бізнесу і корисним для природи. *Ключові слова:* ревіталізація, ремедіація, гумус, ландшафтне проектування, урбанізація, екологічне виробництво, фітоекстракція.

Phytorevitalisation as part of an ecocentric approach to the restoration of contaminated areas. Lytvyn B., Smirnov O., Taran N.
Relevance and Purpose of the Study. The restoration of areas devastated by military action or human-induced pollution is a long and costly process that requires extensive economic and environmental research to determine the cleanup method, subsequent site development, and intended use for future operation. To make this process effective and standardized, it is necessary to investigate the relationship between the ecological integrity of an area and its economic attractiveness. To bridge these distinct fields of expertise, we propose introducing the term "phytorevitalization"–a strategy for restoring territories by influencing the state of the ecocenosis and facilitating their subsequent use, with plants serving as the primary remediation tool and a vital resource for future business development. The goal is to explain the meaning of the term "phytorevitalization" and the feasibility of its use in projects aimed at the "recolonization" of affected regions. To highlight the need for a new approach to soil restoration as a key element in economic development and to demonstrate how remediation influences the creation of new business ventures. Materials and Methods. Methods of information retrieval from print and electronic publications and scientific databases, as well as methods of analysis, comparison, and generalization. Results. Examples of phytoremediation use worldwide are provided, and the potential prospects for applying this approach in Ukrainian territories following military conflict for post-conflict restoration are described. The issue of revitalization measures worldwide is also explored, demonstrating the impact of land remediation on a region's economic prospects. Thus, it is posited that there is a need for further research and the development of programs at the national level to define a framework for phytorevitalization projects. Conclusions. Phytoremediation is a combination of various fields of ecology and economics aimed at developing territories devastated by war and industrial impact, using plants as the primary tool for remediation and the main source of income. This approach aims to create new jobs, added value, and new resource sources for the development of communities and the country in an environmentally sustainable direction that will be profitable for business and beneficial for nature. *Key words:* miscanthus, remediation, humus, landscape design, urbanization, ecological production, phytoextraction.

© Литвин Б.Б., Смірнов О.Є., Таран Н.Ю., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. Війна руйнує навколишнє середовище, залишаючи у спадок забруднення, яке загрожує здоров'ю людей і підриває функціональність екосистеми. Забруднення довкілля важкими металами, нафтовими вуглеводнями, вибуховими речовинами та іншими небезпечними речовинами [1] є поширеним наслідком військової діяльності. Прямі втрати від забруднення, а також непрямі від втрати робочих місць, зміни територіальної демографії та міграції бізнесу, вимагають нових рішень, які інкорпорують ремедіацію грунтового шару з подальшою "реставрацією" відновлених територій для залучення інвестицій, збільшення економічної привабливості та довгострокової доцільності використання оновлених територій.

Актуальність дослідження. Актуальність теми відновлення грунтів внаслідок воєнних дій та індустріального забруднення напряму пов'язана з необхідністю пошуку найбільш оптимальних методів з відновлення понівечених територій задля їх подальшого використання в економіці. Це має особливу актуальність для прифронтових територій України, так як більша частина військових дій проходила на сільськогосподарських угіддях.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження виконано в межах науково-дослідницької тематики кафедри біології рослин ННЦ «Інститут біології та медицини» КНУ ім. Тараса Шевченка та спрямовано на реалізацію у таких міжнародних проєктах як RECOVER [2] та відповідно до Регламенту ЄС 2023/915 [3] задля уніфікації стандартів сільськогосподарського сектору між країнами ЄС та Україною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Фіторемедіація вже давно не нова концепція – це дуже перспективна зелена технологія для пом'якшення впливу війни на навколишнє середовище [4]. Ранні дослідження показали, що багато видів рослин здатні очищати ґрунти, забруднені вуглеводнями, важкими металами та вибуховими речовинами [5]. Особливий потенціал у фіторемедіації демонструють гіперакумулятори – рослини, які мають надзвичайну здатність поглинати та накопичувати значні кількості важких металів у своїх тканинах [4].

В умовах України дана технологія є найбільш доцільною. Кожного дня країна потерпає від ворожих обстрілів цивільної інфраструктури та артилерійським бомбардуванням прифронтових зон, що залишає після себе забруднення, яке буде розкладатися протягом 70 років [1] і робити грунт токсичним. Тому пряме втручання в процес відновлення є необхідним.

Рослини в цьому питанні будуть грати найважливішу роль, бо заберуть на себе питання очищення грунту і разом з тим стануть ядром для підприємств, які можуть використовувати екологічний матеріал у різних цілях для ведення діяльності. В цьому питанні, "Фіто-ревіталізація" – це стратегія створення нових виробничих галузей на основі рослинного матеріалу, який в першому етапі є фундаментом для відновлення поневічених земель та утворення нового екотопу, а в наступних етапах – центральний елемент утворення доданої вартості: через озеленення забудови, переробку на біопаливо, використання в сільськогосподарських цілях. Цей підхід дозволяє стабілізувати екоценози, паралельно розвиваючи нові галузі економіки, що почне новий етап економічно доцільної та екологічно сталої економіки.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Попри наявність значної кількості публікацій щодо використання рослин в відновленні грунтів та статей з ревіталізації територій індустріального призначення, недостатньо дослідженим залишається вплив флори на макрохімічний склад грунту і те, як це в подальшому може вплинути на агротехнічні перспективи ділянки. Зокрема бракує досліджень, які вказують на вплив такої фіторемедіації на екологічну складову середовища і на подальше використання рослин ремеліораторів після виконання їх цільового призначення.

Новизна. Пропонується встановити значення терміну "фіторевіталізація" та продемонструвати участь рослин у відновленні грунтів після контамінації внаслідок воєнних дій та індустріального впливу шляхом дослідження макроелементного стану грунту до і після ремедіативних заходів.

Методологічне або загальнонаукове значення. Отримані результати формують методологічне підгрунтя для переходу від експериментального до стандартизованого підходу в проектах з відновлення пошкоджених територій. Об'єкт дослідження – окремі зразки багаторічних рослин та симбіотичних угруповань з водоростями виду Chlamydomonas rp. та територія ННЦІБМ при КНУ ім. Тараса Шевченка як головна ділянка досліду. Територія кампусу є еталонним місцем для аналізу впливу рослин на грунт, який зазнав будівельного забруднення після процесу розбудови житлових масивів біля метро Виставковий центр та воєнного після обстрілу факультету комп'ютерних наук у 2024 році.

Викладення основного матеріалу. Для обґрунтування ідеї "фіторевіталізації", треба розділити цей термін по двом його складовим і дослідити їх і як окремі галузі науки і як співставні терміни, які поєднуються для реалізації більшої мети. Якщо розбирати "фіто-" частину цієї нової парадигми, то треба висвітлити роль рослин у відновленні забруднених територій. Фіторевіталізація (від гр. phyton – рослина, лат. re … – відновлення та vita – життя, дослівно: повернення життя) – термін, який вказує на процеси повернення життя завдяки рослинним організмам.

Принципом фіторевіталізації є не просто медіація та стабілізація понівечених війною територій, а реабілітація контамінованих зон для створення нових функціональних середовищ. У повоєнний час важливе значення для збереження

довкілля матиме питання розмінування територій та очищення від боєприпасів. У світі вже існують ініціативи, що працюють із наслідками забруднення протипіхотними мінами та іншими вибухонебезпечними пережитками війни, і мають програми очищення для регіонів.

Так, наприклад, Favas et al., [6] пропонують комплекс фіторевіталізаційних заходів на основі біоремедіації в системі грунт-рослина (Рис. 1) з використанням природних бактерій з ґрунтів для розщеплення нафти.

Рослини завдяки своїй біології впливають на забруднення шляхом екстракції та секвестрації, де вони вилучають з грунту хімічні реагенти або важкі метали і завдяки процесу фотосинтезу біосеквеструють вуглекислий газ з повітря у грунт, утворюючи гумус який є основним фундаментом розвитку біоценозу.

Ремедіація важких металів:

Багато досліджень показали, що фіторемедіація є успішним методом відновлення ґрунтів, забруднених важкими металами, такими як свинець, кадмій, миш'як і хром, внаслідок військової діяльності, наприклад, на місцях виробництва боєприпасів і колишніх військових полігонів [7].

Використання рослин для накопичення важких металів у своїй надземній біомасі, відоме як фітоекстракція, вивчалося і успішно застосовувалося у великій кількості контекстів, у тому числі на територіях після видобутку корисних копалин і на військових об'єктах. Наприклад, показано, що ярутка лісова (*Thlaspi caerulescens*) здатна накопичувати до 300 г Cd га-1 у своєму листі лише за два місяці росту на забрудненому полі [8]

В іншому дослідженні порівнювали здатність Буркуна Лікарського (*Melilotus officinalis*) та Щириці загнутою (*Amaranthus retroflexus*) до виведення Cu та Mo із забрудненого ґрунту. Дані показали, що A. retroflexus здатний поглинати Cu і Mo в коренях, а M. officinalis може накопичувати Zn у пагонах [9], [10].

Використовуючи три різні сорти трави Нап'єра (*Pennisetum purpureum*), дослідники нещодавно вивчали поглинання Cd і Zn у польових умовах [11].

Рекультивація вуглеводнів:

Навіть найменша деградація нафтових вуглеводнів також була продемонстрована за допомогою фіторемедіації – поширеного забруднювача військової діяльності, такого як зберігання і транспортування пального.

Деградація або випаровування нафтових вуглеводнів тополями (Populus spp.) і травами була широко досліджена [12], [13].

Було показано, що взаємодія рослин і мікробів посилює деградацію вуглеводнів через ризодеструкцію. Хімічні та графічні дані показали, що кореневища рогізу широколистого (*Typha latifolia*) мають потенціал для фітодеградації тербутилазиду (гербіцид, відноситься до хлортріазинів) [14].

При комбінації Pseudomonas aeruginosa і Bacillus sp., ризобактерії підтримки росту рослин, з мангровим деревом (*Rhizophora mangle*), було спостережено деградацію поліциклічних ароматичних вуглеводнів (PAHs) у забрудненому осаді. [15]

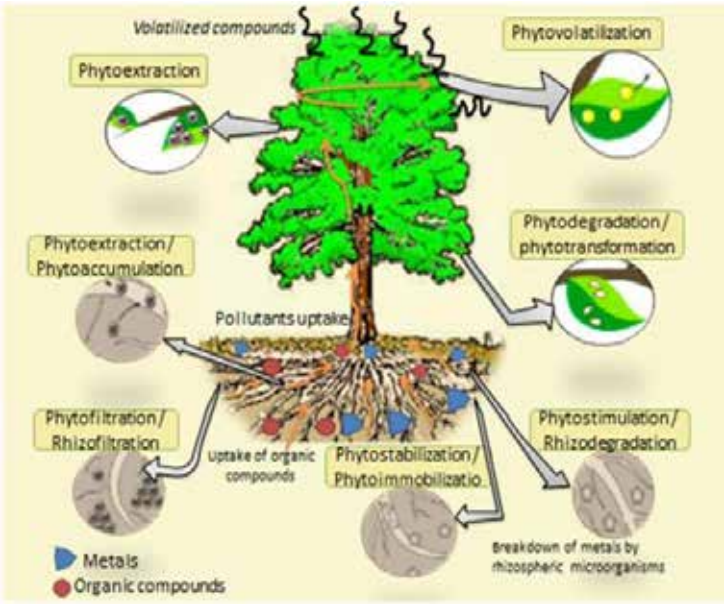


Рис. 1 Основні процеси ремедіації грунту рослиною, які включають: Фітоекстракцію, фітоволатизацію, фітоакумуляцію, фітостабілізацію та фітостимуляцію. [6]

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

Знешкодження вибухових речовин:

ТНТ (тринітротолуол) і RDX (гексагідро-1,3,5-тринітро-1,3,5-триазин) є вибуховими речовинами, які мають свої власні екологічні ризики.

Рослини Бородавочника розчепіреного (*Vetiveria zizanioides*) здатні видаляти з ґрунту до 97% тринітротолуолу (ТНТ) [16]. Тютюн справжній (*Nicotiana tabacum*), після модифікації з додаванням бактеріальної нітроредуктази (nfsI) у пластидах, має здатність до детоксикації тротилу (ТНТ). [17]. Було виявлено, що рослини Populus deltoids мають здатність перетворювати гексагідро-1,3,5-тринітро-1,3,5-триазин (RDX) в метаболічні елементи. [18]

Наведена інформація обєктивно свідчить про участь рослин в процесах фіторемедіації грунтів, але, з огляду на специфіку сучасних воєних технологій, урізноманітнення хімічної складової боєприпасів, проблема потребує досконалого вивчення з огляду на екологію урбо- та агропросторів та комфортного існування людини в них.

Найголовнішими проблемами забруднення грунту під час воєнних дій є забруднення грунту і втрата вмісту гумусу, який необхідний для розвитку рослинності. Отже, для найбільш широкого ефекту, є потреба в дослідженні рослин та бактерій, які здатні як на біоекстракцію, так і на секвертацію вуглецю для відновлення гумусу.

На території ННЦ "Інститут біології та медицини" для реабілітації територій після будівництва ЖК "Standard ONE" були висаджені рослини сорту

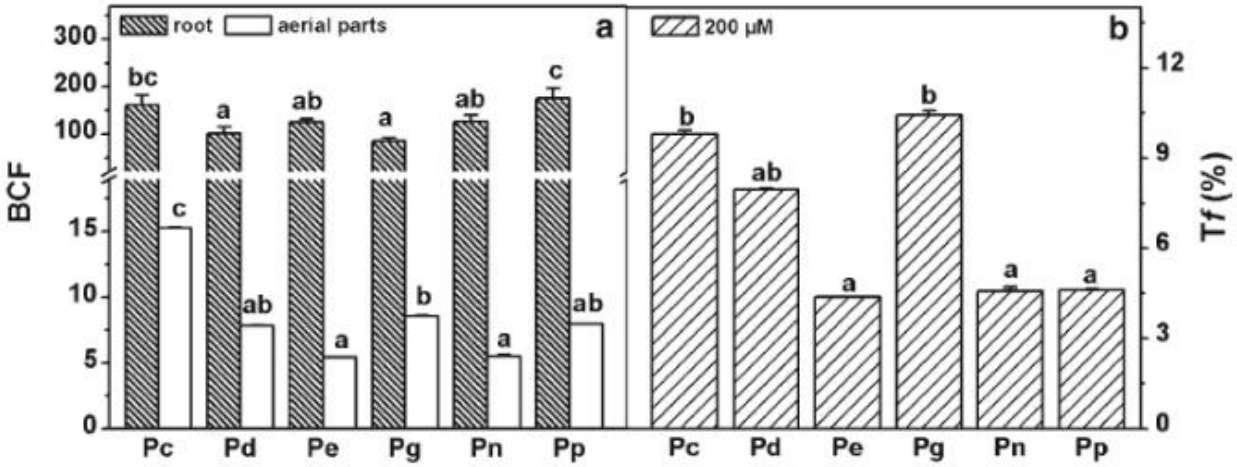


Рис. 2 Фактор біоконцентрації (BCF) та фактор транслокації (Tf) у шести видів тополі, які зазнали впливу 200 мкМ CdSO4 протягом 20 днів. Різні літери на стовпчиках вказують на достовірну різницю між видами. Смуги вказують на середні значення ± SE (n06). Результати статистичного аналізу наведено в таблиці S3.PcP. cathayana,PdP. deltoides,Pe P. ×euramericana,PgP. alba×P. glandulosa,PnP. nigra,PpP.popularis. [12]

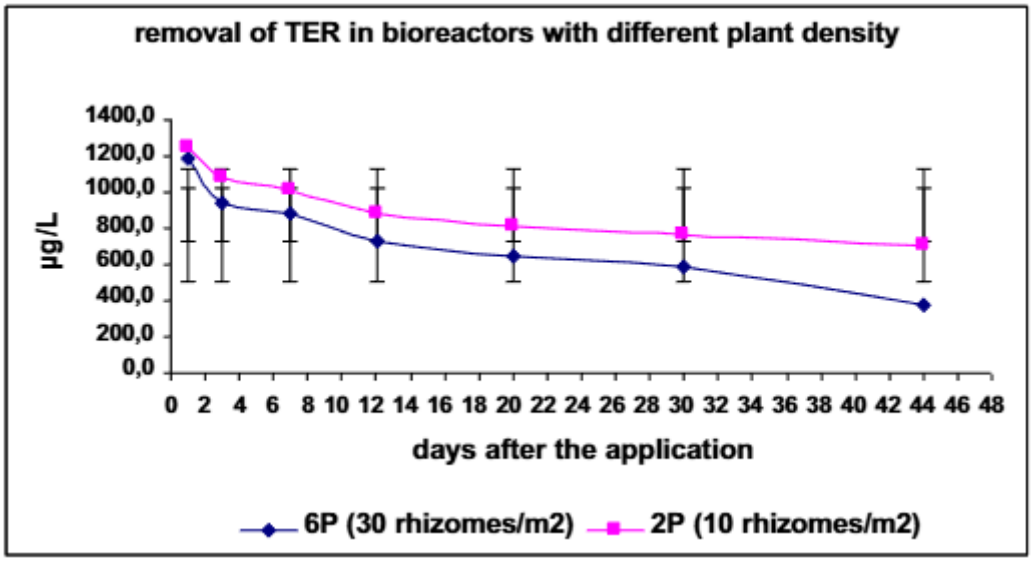


Рис. 3 Розсіювання тербутилазину у різних водно-болотних біореакторах. Щільність рослин 2P (або 10 кореневищ/м2) та 6P (або 30 кореневищ/м2) [14].

Міскантус гігантський (Miscanthus giganteus) для ре-меліорації територій кампусу.

Будучи як гіперакумулятором так і біосеквестратором, використання цього злаку є вирішенням проблеми як забруднення грунту, так і втрати його родючості отже вибір даної рослини полягає в її можливості виконувати як естетичну функцію, так і практичну

Доведено, що вміст органічного вуглецю (основний компонент в процесі гуміфікації) в ґрунті після вирощування міскантусу збільшився на 25,5-45,3%, тоді як екстрактні CaCl2-ME (мікроелементи) зменшилися внаслідок складних ризосферних процесів, що зумовлюють поглинання рослинами мінеральних речовин та надходження органічного вуглецю в ризосферу. [19] У забруднених ґрунтах міскантус накопичував Cd, Pb і Zn переважно в коренях (Фактор біо концентрації (ФБК) в коренях: Cd >> Zn > Pb), при цьому сильно знижуючи перенесення цих елементів з ґрунту в усі інші органи як кореневища, стебла і листя (середній Транслокаційний фактор (ТФ): 0,01-0,06, 0,11-1,15 і 0,09-0,79 для Cd, Pb і Zn відповідно). [20]

Дані фактори є найбільш актуальними для очищення міст, особливо зважаючи на нещодавні обстріли та потрапляння уламків на території виставкового кампусу університету.

Апроксимуючи наявну в літературі інформацію щодо можливих фіторемедіаційних механізмів, варто розглядати сімбиотичні зв'язки рослин з ціанобактеріями, які превалюють в органічній складові грунту, задля створення кращих комбінацій рослинного матеріалу і покращення ефектів фітоекстракції важких металів з грунтів та відновлення макроелементного складу грунту. Так було доведено, що використання фосфаторозчинних бактерій (Bacillus) у забрудненому хімікатами грунті збільшує доступність фосфору в оптимальній для рослин формі [21], і на прикладі Гірчиці салатної (Brassica juncea) викликав збільшення сухої маси рослини на 349% через 8 тижнів після внесення бактерії, що в свою чергу дозволило рослині акумулювати більше важких металів (продемонстровано ріст акумуляції кадмію в різосфері рослини на 148%). [22]

Суха маса Вігни променистої (*Vigna radiata* L.) збільшувалася на 28% у ґрунті, що містив 9780 мг

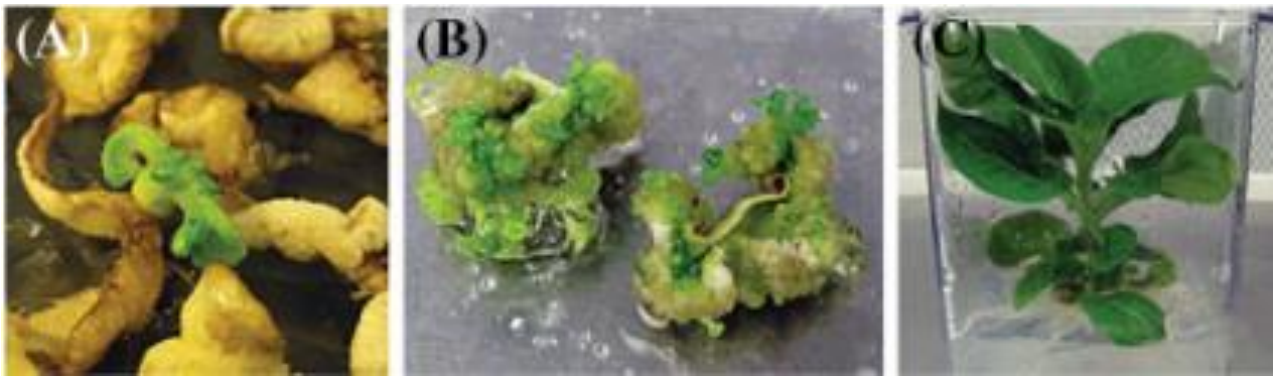


Рис. 4 Етапи трансформації модифікованого тютюну. (A) Зелений 8-тижневий проросток, отриманий з листових дисків під час першого раунду селекції на середовищі з 6-бензиламінопурин та 0,1 мг/л нафталевоцтової кислоти. (B) Проростки, отримані з листових дисків після культивування протягом 3 тижнів під час другого раунду селекції. (C) 3-тижневі регенеровані рослини, що ростуть на метилсульфоніловому середовищі для вкорінення. Всі раунди селекції містили спектиноміцин у концентрації 500 mg/L. [17]



Рис. 5 Вигляд грунту біля фасаду кампусу ННЦ "Інститут біології та медицини" і використання міскантусів

Zn кг-1, і на 24% у ґрунті, що містив 580 мг Ni кг-1, в експериментах з використанням Bradyrhizobium sp. (vigna), стійкої до важких металів N2-фіксуючої бактерії. [23]

Збільшення біомаси рослин супроводжувалося збільшенням загального вмісту азоту в рослинах порівняно з неінокульованим контролем.

Дослідження показали, що фіторемедіація набагато дешевша, ніж більш традиційні методи очищення. Хімічна обробка коштує від $100 до $500 за тонну вивезеного сміття, тоді як вартість обробки за допомогою фіторемедіації становить лише від $20 до $40 за тонну вивезеного сміття. [24]

Було проведено аналогічний аналіз, який показав, що фіторемедіація коштує від $2500 до $15 000 на гектар, тоді як обробка мікроорганізмами коштує від $20 000 до $60 000 на гектар, а обробка мікроорганізмами in situ – від $7500 до $20 000 на гектар для видалення нафтових вуглеводнів. [25]

Ревіталізаційний потенціал відновлення територій будується на оцінці розташування земель та їх подальшого функціонального призначення. Завдяки відновленню грунтів територій, які раніше були забруднені внаслідок воєнної активності або антропогенної діяльності, відкриваються можливості для подальшої експлуатації і розбудови. Ревіталізація відкриває нові логістичні шляхи, дозволяючи створювати економічні зони, які будуть приваблювати підприємства і приносити додаткові робочі місця. Завдяки розмінуванню, економічні артерії Мозамбіка після більш ніж двадцятирічного занепаду стали більш відкритими, відкриваючи нові зв'язки між периферією країни та столицею. [26]



Рис. 6 Наслідки обстрілів біля факультету комп'ютерних наук

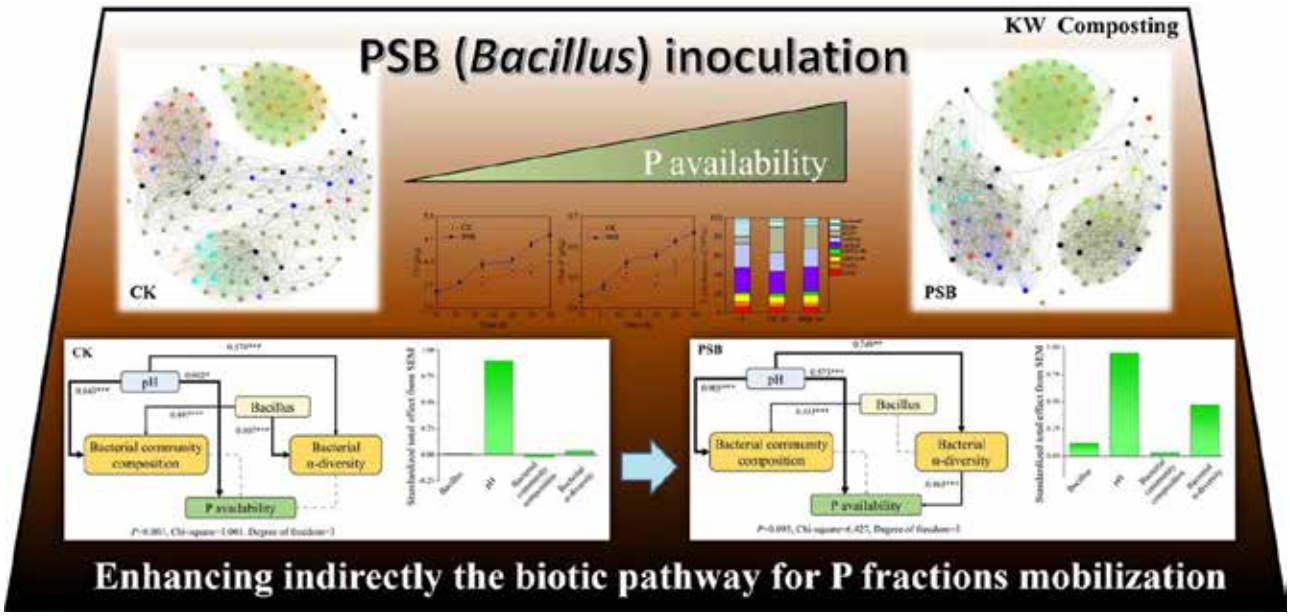


Рис. 7 Графічне відображення впливу інокуляції (вживлення) Bacillus у грунт на доступність фосфору (P) та пов'язану з цим динаміку мікробної спільноти під час процесу компостування. [21]



Рис. 8 Вигляд Форту Бема після ревіталізації. Частина військових будівель стали туристичними зонами і територіями рекреації, зі збудованими спортивними майданчиками та кортами всередині.

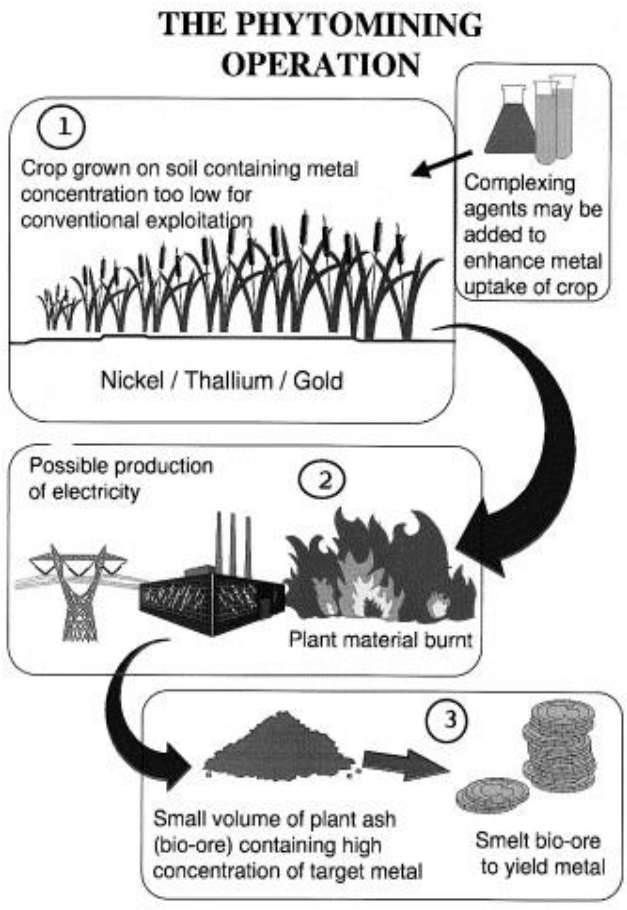


Рис. 9. Схема обробки рослин для фітомайнингу

Це відкрило шлях до залучення нових територій до товарообігу та відкрила кращі шляхи для людей у пошуку роботи та житла, а базові потреби стали більш доступними. Це також підтверджується розрахунками з проекту ревіталізації Форт Бема Парк в Варшаві, що створило екологічний простір на 148 гектарів з житлом та комерцією, що в свою чергу позитивно вплинуло на демографію міста.

Розбудова території старої фортифікації викликало в період з 2006 по 2009 міграційний ажіотаж, де більш ніж 2000 жителів переїхали в район, який до того моменту вважався несприятливим для життя. Таке переселення спричинило відкриття нових підприємств та розбудову нових ліній громадського транспорту для обслуговування нового району. [27]

При фіторевіталізації, сам інструмент оновлення території стає головним джерелом капіталообігу. Таким чином використовується індійська гірчиця як головний інструмент в фітомайнингу – процесу, де рослини висаджують у насичених металами грунтах з метою висушування листків і їх подальшої обробки для екстракції металу. Вона є гіперакумулятором, який краще всього поглинає нікель, який у світі літій-іонних батарей є незамінним металом, ціна на якого росте разом і з величезним попитом світової спільноти. [28]

Головні висновки. Нещодавні дослідження показують, що фіторемедіація у комплексі фіторевіталізаційних процесів стає все більш привабливим як технічно здійсненний і екологічно безпечний

метод дезактивації територій, де ведуться військові дії. Випробування в лабораторії показали, що важкі метали, нафтопродукти і вибухові речовини можна очистити з ґрунту за допомогою цієї технології, яка використовує рослини для поглинання, накопичення і розщеплення забруднюючих речовин.

Було доведено, що різні види рослин здатні ефективно виводити забруднювачі з ґрунту, в тому числі гіперакумулятори та енергетичні культури, такі як міскантус. Рослини та мікроорганізми, такі як ризобактерії, можуть зробити значний внесок у синергію процесів фіторевіталізаці.

Фіторевіталізація має всі переваги, особливо екологічність, дешевизну та відновлення екосистем. В поєднанні з проектами з ревіталізації територій та оцінки майбутніх перспектив, території, які раніше могли вважатися чисто аграрними або індустріальними, можуть отримувати нові призначення, які приносять найбільшу вигоду для підприємств та держави. Завдяки врахуванню логістичного навантаження та доступності людського капіталу, понівечені війною та виробництвом території можуть отримати нове життя і ставати центрами економічного відновлення, при цьому дотримуючись стандартів сталого розвитку урбаністичного середовища.

Перспективи використання результатів дослідження. Практична цінність результатів найбільше проявляється для територіальних громад, чиїм основним видом заробітку була сільськогосподарська діяльність. Разом з тим, існує потреба в розробці оптимальних стратегій фіторемедіації для різних типів забруднення, а також в оцінці довгострокового впливу на економічні показники окремих регіонів, враховуючи кліматоформуючу функцію фітоценозів. В подальших дослідженнях пропонується більш детально розглянути питання ремедіативного ефекту рослин на територіях антропогенного впливу, які в подальшому планується передати на агро сферу або під житлову забудову. Окрім цього, варто дослідити питання створення процедур фітоекстракції забруднюючих реагентів та дослідження впливу біосеквестрації на родючість грунту і подальше створення бізнес-моделі використання рослин гіперакумуляторів та грунтових водоростей як основний інструмент очищення грунту і подальшу переробку для біопалива.

Література

1. UNEP. The Environmental Impact of the Conflict in Ukraine. 2022. URL: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/40746/environmental_impact_Ukraine_conflict.pdf?sequence=3&isAllowed=y (дата звернення: 03.09.2026).
2. RECOVER. 2025. URL: https://recover-ukraine.com. (дата звернення: 03.09.2026).
3. COMMISSION REGULATION (EU) 2023/915 of 25 April 2023 on maximum levels for certain contaminants in food and repealing Regulation (EC). No 1881/2006. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/915/oj/eng (дата звернення: 03.09.2026).
4. Varkey M., Lal N., Khan Z. H. Phytoremediation: Strategies to Enhance the Potential for Toxic Metal Remediation of Brassica Oilseed Species. 2012. URL: https://www.researchgate.net/publication/289718210_Phytoremediation (дата звернення: 03.09.2026).
5. Baker A. J. M., Reeves R. D., Brooks R. R. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements – A review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery*. 2000. Vol. 1. P. 81–126. URL: https://www.researchgate.net/publication/247713966_Terrestrial_Higher_Plants_Which_Hyperaccumulate_Metallic_Elements_A_Review_of_Their_Distribution_E (дата звернення: 03.09.2026).
6. Phytoremediation of soils contaminated with metals and metalloids at mining areas: potential of native flora / P. J. Favas et al. *Environmental Risk Assessment of Soil Contamination*. 2014. Vol. 3. P. 485–516. URL: https://www.researchgate.net/publication/261100081_Phytoremediation_of_Soils_Contaminated_with_Metals_and_Metalloids_at_Mining_Areas_Potential_of_Native_Flora (дата звернення: 03.09.2026).
7. Islam Md. M., Saxena N., Sharma D. Phytoremediation as a green and sustainable prospective method for heavy metal contamination: a review. 2024. URL: https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2024/su/d3su00440f (дата звернення: 03.09.2026).
8. The possibility of in situ heavy metal decontamination of polluted soils using crops of metal-accumulating plants / A. J. M. Baker et al. 1994. URL: https://www.academia.edu/49309364/The_possibility_of_in_situ_heavy_metal_decontamination_of_polluted_soils_using_crops_of_metal_accumulating_plants (дата звернення: 03.09.2026).
9. Steliga T., Kluk D. Assessment of the Suitability of Melilotus officinalis for Phytoremediation of Soil Contaminated with Petroleum Hydrocarbons (TPH and PAH), Zn, Pb and Cd Based on Toxicological Tests. 2021. URL: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8309879/ (дата звернення: 03.09.2026).
10. A meta-analysis on the heavy metal uptake in Amaranthus species / D. Tőzsér et al. 2023. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-023-28374-3 (дата звернення: 03.09.2026).
11. Potential use of Pennisetum purpureum for phytoremediation and bioenergy production: a mini review / N. A. Osman et al. 2020. URL: https://www.researchgate.net/publication/338718761_Potential_use_of_Pennisetum_purpureum_for_phytoremediation_and_bioenergy_production_a_mini_review (дата звернення: 03.09.2026).
12. Cadmium tolerance in six poplar species / J. He et al. 2013. URL: https://www.researchgate.net/publication/225272978_Cadmium_tolerance_in_six_poplar_species (дата звернення: 03.09.2026).
13. Pajevič S., Borišev M. Phytoremediation capacity of poplar (Populus spp.) and willow (Salix spp.) clonesin relation to photosynthesis. 2009. URL: https://www.semanticscholar.org/reader/1be37f959b12e1e647de08675e768383a4a26c9c (дата звернення: 03.09.2026).

14. Papadopoulos N., Zalidis G. The Use of Typha Latifolia L. in Constructed Wetland Microcosms for the Remediation of Herbicide Terbuthylazine. 2019. URL: https://www.academia.edu/108081252/The_Use_of_Typha_Latifolia_L_in_Constructed_Wetland_Microcosms_for_the_Remediation_of_Herbicide_Terbuthylazine (дата звернення: 03.09.2026).
15. Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in a diesel oil-contaminated mangrove by plant growth-promoting rhizobacteria / C. J. S. Sampaio et al. 2019. URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30944802/ (дата звернення: 03.09.2026).
16. High uptake of 2,4,6-trinitrotoluene by vetiver grass – Potential for phytoremediation? / K. C. Makris et al. 2007. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749106004015?via%3Dihub (дата звернення: 03.09.2026).
17. Phytodetoxification of TNT by transplastomic tobacco (Nicotiana tabacum) expressing a bacterial nitroreductase / L. Zhang et al. 2017. URL: https://www.researchgate.net/publication/318799509_Phytodetoxification_of_TNT_by_transplastomic_tobacco_Nicotiana_tabacum_expressing_a_bacterial_nitroreductase (дата звернення: 03.09.2026).
18. Just C. L., Schnoor J. L. Phytophotolysis of hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX) in leaves of reed canary grass. 2004. URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14740749/ (дата звернення: 03.09.2026).
19. Potentials of Miscanthus x giganteus for phytostabilization of trace element contaminated soils: Ex situ experiment / F. Nsanganwimana et al. 2021. URL: https://hal.science/hal-04288721/document (дата звернення: 03.09.2026).
20. Bastia G., Al Souki K. S., Pourrut B. Evaluation of Miscanthus × giganteus Tolerance to Trace Element Stress: Field Experiment with Soils Possessing Gradient Cd, Pb, and Zn Concentrations. 2023. URL: https://hal.science/hal-04288721/document (дата звернення: 03.09.2026).
21. Zhang X. Inoculation of phosphate-solubilizing bacteria (Bacillus) regulates microbial interaction to improve phosphorus fractions mobilization during kitchen waste composting. 2021. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852421010555 (дата звернення: 03.09.2026).
22. Survival of introduced phosphate solubilizing bacteria (PSB) and their impact on microbial community structure during the phytoextraction of Cd-contaminated soil / S. Jeong et al. *Journal of Hazardous Materials*. 2013. Vol. 263. P. 441–449. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389413007061?via%3Dihub (дата звернення: 03.09.2026).
23. Wani P. A., Khan M. S., Zaidi A. Effect of metal tolerant plant growth promoting Bradyrhizobium sp. (vigna) on growth, symbiosis, seed yield and metal uptake by greengram plants. *Chemosphere*. 2007. Vol. 70. P. 36–45. URL: https://www.academia.edu/53534288/Effect_of_metal_tolerant_plant_growth_promoting_Bradyrhizobium_sp_vigna_on_growth_symbiosis_seed_yield_and_metal_uptake_by_greengram_plants (дата звернення: 03.09.2026).
24. Salt D. E., Smith R. D., Raskin I. Phytoremediation of metals: using plants to remove pollutants from the environment. 1998. URL: https://www.academia.edu/8745483/1998_Salt_Phytoremediation (дата звернення: 03.09.2026).
25. Phytoremediation of Soils Contaminated with Organic Pollutants / S. D. Cunningham et al. *Advances in Agronomy*. 1996. URL: https://www.academia.edu/17512268/Phytoremediation_of_Soils_Contaminated_with_Organic_Pollutants (дата звернення: 03.09.2026).
26. Chiovelli A., Michalopoulos S., Papaioannou E. What are the economic effects of landmine clearance? *VoxDev / Centre for Economic Policy Research*. 2018. URL: https://voxdev.org/topic/infrastructure/what-are-economic-effects-landmine-clearance (дата звернення: 03.09.2026).
27. Sobieraj J., Metelski D. Innovative Approaches to Urban Revitalization: Lessons from the Fort Bema Park and Residential Complex Project in Warsaw. *Buildings*. 2025. URL: https://www.mdpi.com/2075-5309/15/4/538 (дата звернення: 03.09.2026).
28. Kikis C., Thalassinos G., Antoniadis V. Soil Phytomining: Recent Developments–A Review. *Soil Systems*. 2024. URL: https://www.mdpi.com/2571-8789/8/1/8 (дата звернення: 03.09.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 04.09.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

УДК 504.054:621.311
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.9

ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНІЧНОГО РІШЕННЯ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ВИКИДІВ ОКСИДУ ВУГЛЕЦЮ У ВИКИДНИХ ГАЗАХ

Михайлюк Ю.Д. (orcid.org/0000-0003-2448-3847),
Давидчук Д. В. (orcid.org/0009-0007-8038-5375)
Івано-Франківський національний технічний університету нафти і газу
вул. Карпатська 15, м. Івано-Франківськ
yuliia.mykhailiuk@nung.edu.ua, dariia.davydchuk-eko231@nung.edu.ua

У статті проведено комплексну оцінку екологічної ефективності нового технічного рішення, спрямованого на зниження вмісту токсичного оксиду вуглецю (*CO)* у викидних газах компресорних установок. Забруднення атмосферного повітря продуктами неповного згоряння палива залишається гострою екологічною проблемою для урбанізованих територій і промислових зон з високою концентрацією енергетичного обладнання. Традиційні каталітичні та плазмокаталітичні методи очищення мають суттєві обмеження, пов'язані з високою чутливістю каталізаторів до складу газів, їх термічною деградацією, а також значними енергетичними витратами на генерацію плазми в усьому об'ємі відхідних газів.

Запропонований у роботі альтернативний підхід базується на процесах гомогенного безкаталітичного доокислення молекул оксиду вуглецю до значно менш токсичного діоксиду вуглецю *(CO_2)* шляхом введення активованого повітряного потоку безпосередньо у викидний тракт компресорної установки. Повітря піддається попередньому іонізаційному впливу жорсткого ультрафіолетового випромінювання, що забезпечує генерацію активних форм кисню та радикалів *(O, O_3, OH)*. Завдяки підвищеній реакційній здатності цих частинок, процеси ланцюгового окиснення інтенсифікуються без застосування твердих каталітичних систем, що дозволяє реалізувати екозахисний процес за відносно помірних температур газового середовища та мінімізувати експлуатаційні витрати.

У ході дослідження детально проаналізовано кінетику радикальних реакцій та систематизовано основні групи екологічних і газодинамічних факторів, які безпосередньо впливають на стабільність і сумарний екологічний ефект очищення. Доведено, що перетворення токсичного *CO* на CO_2 є екологічно обґрунтованим компромісом у межах задач охорони атмосферного повітря через значно нижчу токсичність діоксиду вуглецю та зниження локального екотоксичного навантаження біля промислових майданчиків. Запропоноване рішення конструктивно адаптаційне і може бути легко інтегроване в існуючі викидні системи без суттєвої зміни їхньої геометрії. *Ключові слова:* компресорні установки, іонізація повітря, охорона атмосферного повітря, активні форми кисню, екологічна безпека.

Assessment of environmental effectiveness of a technical solution for reducing carbon monoxide emissions in exhaust gases. Mykhailiuk Yu., Davydchuk D.

The paper provides a comprehensive assessment of the environmental efficiency of a new technical solution aimed at reducing the content of toxic carbon monoxide *(CO)* in the exhaust gases of compressor units. Atmospheric pollution by products of incomplete fuel combustion remains a severe environmental hazard for urbanized areas and industrial zones with a high concentration of energy equipment. Traditional catalytic and plasma-catalytic treatment methods have significant limitations related to the high sensitivity of catalysts to the gas composition, their thermal degradation, and substantial energy consumption required for plasma generation within the entire volume of exhaust gases.

The alternative approach proposed in the study is based on the processes of homogeneous non-catalytic post-oxidation of carbon monoxide molecules to significantly less toxic carbon dioxide *(CO_2)* by introducing an activated air stream directly into the exhaust duct of the compressor unit. The air flow is exposed to the preliminary ionizing effect of hard ultraviolet radiation, which ensures the generation of reactive oxygen species and radicals *(O, O_3, OH)*. Due to the increased reactivity of these particles, the chain oxidation processes are intensified without the use of solid catalytic systems. This allows the eco-protective process to be implemented at relatively moderate gas medium temperatures and minimizes operating costs.

In the course of the research, the kinetics of radical reactions were analyzed in detail, and the main groups of environmental and gas-dynamic factors that directly affect the stability and total environmental effect of the purification process were systematized. It is proved that the conversion of toxic *CO* into CO_2 is an environmentally justified compromise within the framework of atmospheric air protection tasks due to the significantly lower toxicity of carbon dioxide and the reduction of local ecotoxic load near industrial sites. The proposed solution is structurally adaptive and can be easily integrated into existing exhaust systems without significant changes to their geometry. *Key words:* compressor units, air ionization, atmospheric protection, reactive oxygen species, environmental safety.

© Михайлюк Ю.Д., Давидчук Д. В., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. Забруднення атмосферного повітря продуктами неповного згоряння палива залишається гострою екологічною проблемою для урбанізованих територій і зон з концентрацією енергетичних та компресорних установок. Оксид вуглецю *(CO)* є одним із найбільш небезпечних компонентів викидних газів, оскільки характеризується високою токсичністю та здатністю негативно впливати на стан здоров'я людини навіть за відносно невеликих концентрацій. У зв'язку з цим мінімізація антропогенного навантаження на атмосферу вимагає пошуку нових екологічно безпечних підходів до знешкодження цього полютанта.

Актуальність дослідження. Сучасні світові тенденції та дослідження [1] підтверджують значущу роль *CO* у формуванні ризиків для здоров'я населення та екологічної безпеки атмосферного повітря. Потреба в оптимізації екологічних показників промислових об'єктів в умовах жорсткіших нормативних вимог зумовлює необхідність розвитку і вдосконалення технологій перетворення *CO* у менш токсичні сполуки без значних додаткових витрат енергоресурсів, що робить тему даного дослідження вкрай нагальною.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Практична необхідність зменшення викидів оксиду вуглецю пов'язана із виконанням завдань охорони навколишнього природного середовища та екологічної безпеки промислових зон. Дана робота спрямована на вирішення науково-практичного завдання щодо оцінки екологічної ефективності конкретних технічних рішень для очищення відхідних газів компресорних установок від *CO,* що базуються на іонізації повітря та ініціації процесів доокислення оксиду вуглецю [2], розроблених на базі Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних наукових дослідженнях приділяється значна увага зменшенню викидів *CO*. Зокрема, у роботі [1] наведено результати моделювання викидів *CO* та *NOx* для газотурбінних установок, що підтверджує складність прогнозування концентрацій забруднювачів.

Найбільш поширеним напрямом залишається каталітичне окиснення. У роботі [3] представлено огляд сучасних каталізаторів на основі оксидів металів, а у дослідженні [4] показано перспективність використання комбінованих металоксидних систем для розширення температурного діапазону їх роботи.

Альтернативним напрямом є використання плазмохімічних і плазмокаталітичних методів. У роботі [5] узагальнено досягнення у сфері плазмокаталізу та показано синергетичний ефект поєднання плазми з каталітичними матеріалами. Дослідження [6] демонструє ефективність нетермічної плазми у поєднанні з каталізаторами для окиснення *CO* за відносно низьких температур, а у роботі [7] розглядаються процеси конверсії газів у межах циркулярної економіки. Водночас у зазначених роботах наголошується на обмеженнях методів: чутливості каталізаторів до складу газів та високих енергетичних витратах.

Перспективним вектором розвитку безкаталітичних екозахисних технологій є дослідження фотохімічних процесів. Так, у праці [8] детально вивчено кінетичне моделювання гомогенного окиснення оксиду вуглецю в газових потоках, що підтверджує високу швидкість взаємодії компонентів за наявності активних центрів. Механізми генерування вільних радикалів під дією жорсткого ультрафіолетового випромінювання для деструкції газових забруднювачів атмосфери екологічно обґрунтовано у дослідженні [9]. Крім того, комплексний аналіз інженерних рішень для зниження екологічного сліду газотранспортної інфраструктури, зокрема на компресорних станціях, наведено у роботі [10], де підкреслено пріоритетність впровадження локальних систем очищення відхідних газів.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Попри значну кількість досліджень, у низці робіт [5–7] зазначається, що впровадження плазмокаталітичних систем у промислові установки потребує подальшого обґрунтування їх екологічної доцільності та адаптації до конкретних умов. Недостатньо висвітленими залишаються питання застосування іонізаційних методів безпосередньо у викидних трактах компресорних та енергетичних установок. В науковій літературі обмежено представлено результати оцінки екологічної ефективності технічних рішень, які базуються на іонізації повітря без суттєвого ускладнення конструкції установки [7], що й зумовило виконання цього дослідження.

Новизна. Наукова новизна роботи полягає в обґрунтуванні механізму зменшення концентрації оксиду вуглецю у викидних трактах компресорних установок за рахунок безкаталітичного доокислення за допомогою активних форм кисню, отриманих шляхом ультрафіолетової іонізації повітря. Вперше комплексно систематизовано екологічні чинники (параметри іонізації, витрати, режими роботи установки), які безпосередньо формують сумарний екологічний ефект процесу перетворення *CO* до CO_2 безпосередньо у швидкісному газовому потоці.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічне значення дослідження полягає у формуванні комплексного підходу до оцінювання ефективності процесів очищення викидних газів, що передбачає одночасне врахування як хімічних аспектів перетворення токсичних компонентів (кінетики окиснення), так і експлуатаційних (газодинамічних та конструктивних) характеристик промислового обладнання. Це дозволяє розширити методологічну базу екологічного моніторингу та проектування екозахисних систем.

Викладення основного матеріалу. Зменшення вмісту оксиду вуглецю *(CO)* у викидних газах

є складним науково-технічним завданням, що потребує врахування як кінетики хімічних процесів окиснення, так і специфіки формування газодинамічних потоків у викидних трактах компресорних установок. Як свідчать результати сучасних досліджень, ефективність перетворення *CO* значною мірою залежить від наявності активних окиснювальних агентів та умов їх гомогенної взаємодії з компонентами викидних газів [5–7].

Запропонований у роботі підхід [2] ґрунтується на концепції штучної інтенсифікації окиснювальних процесів шляхом контрольованої подачі іонізованого повітря безпосередньо у викидний тракт компресорної установки. Повітряний потік з навколишнього середовища спрямовується до іонізаційного блока, де піддається інтенсивному впливу жорсткого ультрафіолетового випромінювання (УФ) певного спектрального діапазону.

Під дією квантів світла *(hv)* відбувається фотодисоціація молекулярного кисню, що міститься в повітрі, з утворенням високореакційних вільних радикалів та активних форм кисню (АФК). Основними первинними реакціями в зоні іонізації є:

$$O_2 + hv \rightarrow O(1D) + O(3P)$$
$$O_2 + O(3P) + M \rightarrow O_3 + M,$$

де *O(1D)* та *O(3P)* відповідно синглетний (збуджений) та триплетний (основними) стани атомарного кисню; *M* – третя частинка (наприклад, молекула азоту N_2 або інший інертний компонент повітря), яка поглинає надлишок енергії під час потрійного зіткнення.

Наявність у потоці вологи (парів води) призводить до додаткового генерування гідроксильних радикалів *(OH)*, які характеризуються надзвичайно високим окиснювальним потенціалом:

$$O(1D) + H_2O \rightarrow 2OH$$

Після виходу з іонізаційного блока активована газоповітряна суміш, насичена озоном (O_3) та атомарними радикалами кисню, впорскується через спеціальну систему форсунок у викидний тракт. На етапі змішування іонізованого повітря з відпрацьованими газами компресорної установки ініціюється ланцюгова реакція доокислення оксиду вуглецю до діоксиду вуглецю (CO_2). Головними хімічними маршрутами цього процесу є:

$$CO + O \rightarrow CO_2$$
$$CO + O_3 \rightarrow CO_2 + O_2$$
$$CO + OH \rightarrow CO_2 + H$$
$$H + O_2 \rightarrow OH + O$$

Завдяки високій реакційній здатності генерованих радикалів, константи швидкості цих реакцій є на кілька порядків вищими порівняно зі звичайним молекулярним окисненням киснем повітря. Це дозволяє ефективно проводити доокислення *CO* за помірних температур газового середовища (без потреби додаткового підігріву відхідних газів), що суттєво підвищує загальну енергоефективність екозахисної системи. Окрім цього, безкаталітичний характер процесу усуває ризики отруєння чи деградації активної поверхні, які є критичними для традиційних металоксидних систем у реальних промислових умовах.

Запропоноване технічне рішення конструктивно адаптаційне: іонізаційний модуль інтегрується у існуючі системи відведення газів без кардинального втручання в геометрію тракту та режим роботи компресора. Проте сумарна екологічна ефективність системи очищення не є константною і визначається балансом низки чинників, які систематизовано в табл. 1.

З фізико-хімічної та аеродинамічної точок зору ключовим обмеженням системи є час контакту *(τ)* між активними радикалами та молекулами *CO*. Швидкість руху відхідних газів у викидних трактах компресорних установок є досить високою, а лінійні розміри зони реакції обмежені. Оскільки час життя вільних атомів кисню та радикалів є дуже малим (через процеси рекомбінації), архітектура системи форсунок повинна забезпечувати миттєву дифузію іонізованого потоку в основний об'єм газу для максимізації ймовірності ефективних зіткнень частинок.

Екологічний ефект впровадження розробленого методу полягає у суттєвому зниженні екотоксичного навантаження. З позицій екологічної безпеки, заміна

Таблиця 1

Фактори, що визначають екологічну ефективність зменшення вмісту *CO* у викидних газах

Група факторів	Характеристика впливу	Екологічне значення
Параметри іонізації повітря	Визначають інтенсивність утворення активних форм кисню *(O, O_3, OH)*	Забезпечують умови для високошвидкісного доокислення *CO*
Витрата іонізованого повітря	Впливає на якість та ступінь гомогенного змішування з викидними газами	Сприяє зниженню локальної концентрації *(CO)* у загальному потоці
Концентрація *CO* у викидних газах	Характеризує початковий рівень забруднення середовища	Визначає потенціал і граничні межі екологічного ефекту очищення
Температурний режим газового потоку	Впливає на константи швидкості радикальних реакцій	Забезпечує оптимальну кінетику без додаткових витрат палива
Режим роботи компресорної установки	Обумовлює динамічну змінність складу та витрати газів	Визначає стабільність екологічного ефекту в часі

високотоксичного *CO* (ГДК якого в атмосферному повітрі є жорстко обмеженою) на діоксид вуглецю CO_2, попри його парникову природу, є повністю обґрунтованим компромісом. Локальне зниження концентрації чадного газу біля промислових майданчиків дозволяє радикально мінімізувати ризики для здоров'я населення та покращити загальний стан приземного шару атмосфери в зоні впливу компресорних станцій.

Порівняно з плазмокаталітичними комплексами [5, 6], де плазма генерується безпосередньо всередині всього об'єму очищуваного газу (що вимагає великих енергетичних витрат і складних реакторів), використання винесеного УФ-іонізатора повітря є набагато простішим та економічно вигіднішим рішенням, адаптованим до умов реальної промислової експлуатації.

Головні висновки

1. У ході проведеного дослідження досягнуто поставленої мети, що полягала в оцінці екологічної ефективності технічного рішення, спрямованого на зменшення вмісту оксиду вуглецю у викидних газах компресорних установок шляхом іонізації повітря та ініціації процесів доокислення *CO*.

2. Встановлено, що використання іонізованого повітря створює сприятливі умови для інтенсифікації процесів окиснення оксиду вуглецю до діоксиду вуглецю без застосування традиційних каталітичних систем, що дозволяє уникнути обмежень, пов'язаних із деградацією каталізаторів.

3. Показано, що запропоноване технічне рішення може бути інтегроване у існуючі викидні тракти компресорних установок без суттєвого втручання у їх конструкцію. Реалізація процесу іонізації не потребує значного підвищення температури газового середовища, що є важливим з погляду енергоефективності.

4. Доведено, що екологічний ефект від застосування розглянутого підходу полягає у зниженні концентрації оксиду вуглецю як одного з найбільш токсичних компонентів викидних газів, що сприяє зменшенню негативного токсичного навантаження на атмосферне повітря в зонах розміщення компресорної інфраструктури.

Перспективи використання результатів дослідження

Перспективи подальших досліджень у даному напрямі пов'язані з проведенням кількісної оцінки ефективності зменшення вмісту оксиду вуглецю за різних режимів роботи компресорних установок, а також з оптимізацією параметрів процесу іонізації повітря. Практична цінність результатів полягає у можливості їх використання під час модернізації систем очищення відхідних газів компресорних станцій магістральних газопроводів та промислових підприємств з метою зниження плати за викиди та покращення екологічного стану прилеглих територій.

Література

1. Coelho L. dos S., Ayala H. V. H., Mariani V. C. CO and NOx emissions prediction in gas turbine using a novel modeling pipeline based on the combination of deep forest regressor and feature engineering. *Fuel*. 2024. Vol. 357. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.129366.
2. Михайлюк Ю. Д. Спосіб очистки відхідних газів компресорних установок від CO: пат. 102157 Україна: МПК B01J 38/00, C10K 1/00. № u201413739; заявл. 22.12.2014; опубл. 26.10.2015, Бюл. № 20.
3. Dey S. Oxidation of carbon monoxide over various nickel oxide catalysts in different conditions: A review. *Cleaner Engineering and Technology*. 2020. Vol. 1. DOI: 10.1016/j.ceja.2020.100008.
4. Zheng Y., Zhou H., Su W., Xing Y. Progress in metal oxide catalysts for carbon monoxide oxidation. *Catalysts*. 2026. Vol. 16, № 1. DOI: 10.3390/catal16010007.
5. Yan C., Zhu X., Li Y., Tu X. Recent advances in plasma catalysis. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2022. Vol. 126, № 23. DOI: 10.1021/acs.jpcc.2c03062.
6. Zhang J., Liu Y., Wang Z. et al. Nonthermal plasma-assisted catalytic oxidation of carbon monoxide over CuOx@γ-Al2O3. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2019. Vol. 123, № 15. DOI: 10.1021/acs.jpcc.9b03010.
7. Mukhtar A., Saqib S., Mohotti D. et al. Non-thermal plasma-catalytic processes for CO2 conversion toward circular economy: fundamentals, current status, and future challenges. *Environmental Science and Pollution Research*. 2025. Vol. 32, № 48. DOI: 10.1007/s11356-024-34751-3.
8. Gurgel F. M., Santos J. C., Sousa J. A. Kinetic modeling of carbon monoxide low-temperature homogeneous oxidation in gas-phase reactions. *Chemical Engineering Journal*. 2024. Vol. 481. DOI: 10.1016/j.cej.2023.147852.
9. Wang Y., Chen T., Zhang L. et al. UV-induced reactive oxygen species generation and radical processes for the degradation of atmospheric pollutants. *Environmental Science & Technology*. 2024. Vol. 58, № 11. DOI: 10.1021/acs.est.3c09121.
10. Blumberg T., Tsatsaronis G. Mitigation of the environmental footprint of natural gas compressor stations: A thermodynamic and environmental assessment. *Energy*. 2024. Vol. 290. DOI: 10.1016/j.energy.2023.130112.

Дата першого надходження статті до видання: 16.07.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

UDC 504.53:628.4:622.276
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.10

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF REMEDIATION OF PETROLEUM-CONTAMINATED SOILS FOLLOWING AN ACCIDENTAL OIL SPILL

Sokolov A. V. (orcid.org/0009-0007-1385-8873)
State Scientific Institution "Institute of Environmental Restoration and Development of Ukraine"
35 Block 2, V. Lypkivskogo Street, 02000, Kyiv
staroilua@gmail.com

This paper presents the results of a comprehensive assessment of the effectiveness of remediating soils contaminated with light petroleum products following the destruction of fuel storage tanks at an oil depot in the urban-type settlement of Borodianka, Kyiv Region, Ukraine, during military operations. The study employed an integrated methodology combining field hydrogeological investigations, mathematical modeling of contaminant migration within the vadose zone, laboratory analyses, and an experimental evaluation of an integrated remediation technology consisting of free-phase petroleum product recovery, decantation, and vacuum distillation. The remediation performance was quantitatively evaluated using a set of integrated indicators, including the contamination reduction coefficient, residual contamination coefficient, environmental hazard reduction coefficient, integrated potential migration hazard index, and the mass balance of recovered petroleum products. The proposed remediation technology reduced the average concentration of petroleum hydrocarbons in soil from 43,640 mg kg^{-1} to 2,180 mg kg^{-1}, corresponding to an overall remediation efficiency of 95%. The overall contamination reduction coefficient reached 20.0, whereas the decantation and vacuum distillation stage alone achieved a reduction coefficient of 8.61. The calculated environmental hazard reduction coefficient indicates a substantial decrease in the risk of secondary contamination of both soils and groundwater. These findings demonstrate the effectiveness of the integrated remediation approach for mitigating the environmental consequences of accidental petroleum spills and provide a scientific basis for the development of technological guidelines for the reclamation of petroleum-contaminated sites. *Key words:* petroleum products; soil contamination; accidental oil spill; free-phase recovery; decantation; vacuum distillation; soil remediation; environmental efficiency; mass balance.

Комплексна оцінка ефективності очищення забруднених нафтопродуктами ґрунтів після аварійного розливу. Соколов А.В.

Означені результати комплексної оцінки ефективності очищення ґрунтів, забруднених світлими нафтопродуктами внаслідок аварійного руйнування резервуарів на нафтобазі в смт Бородянка Київської області під час воєнних дій. Дослідження виконано на основі поєднання польових гідрогеологічних досліджень, математичного моделювання процесів міграції забруднювачів у зоні аерації, лабораторних випробувань та експериментальної оцінки ефективності комплексної технології очищення, що включає механічне вилучення вільної фази нафтопродуктів, декантацію та вакуумну дистиляцію. В дослідженнях виконано кількісну оцінку ефективності очищення із застосуванням системи інтегральних показників, що передбачають означення коефіцієнту зниження забруднення та залишкового забруднення, коефіцієнт екологічної небезпечності, інтегральний індекс потенційної міграційної небезпеки та масовий баланс вилучених нафтопродуктів. Під час виконання досліджень, відповідних регламентних робіт встановлено, що застосування комплексної технології забезпечило зниження середньої концентрації нафтопродуктів у ґрунті з 43640 до 2180 мг/кг, що відповідає загальній ефективності очищення 95%. При цьому, коефіцієнт зниження забруднення становив 20,0, а безпосередньо для стадії декантації та вакуумної дистиляції – 8,61. Розрахований коефіцієнт зниження екологічної небезпеки свідчить про істотне зменшення ризику вторинного забруднення ґрунтів і підземних вод. Отримані результати підтверджують доцільність застосування комплексного підходу до ліквідації наслідків аварійних розливів нафтопродуктів та можуть бути використані при розробленні технологічних регламентів рекультивації забруднених земель. *Ключові слова:* нафтопродукти, забруднення ґрунтів, аварійний розлив, механічне вилучення, декантація, вакуумна дистиляція, ремедіація, екологічна ефективність. масовий баланс.

Introduction. Accidental releases of petroleum products remain one of the most serious anthropogenic threats to the geological environment. Damage to storage tanks containing light petroleum products (LRPPs) results in the rapid infiltration of low-viscosity hydrocarbons through the vadose zone, followed by their accumulation as floating free-product lenses at the groundwater table. Such contamination sources are characterized by high mobility, long-term persistence, and the ability to generate extensive zones of secondary contamination affecting both soils and groundwater [1]. The remediation of petroleum-contaminated sites has become particularly important in Ukraine following the onset of the full-scale military invasion, during which numerous fuel storage and energy infrastructure facilities were damaged or destroyed [2]. The destruction of tank farms resulted in large-scale releases of gasoline and diesel fuel, causing extensive contamina-

© Sokolov A. V., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

tion of soils, the vadose zone, and groundwater systems. Under these circumstances, conventional remediation techniques frequently prove inadequate because they fail to ensure the efficient removal of both free-phase and sorbed petroleum hydrocarbons. In addition, many existing technologies require costly equipment, involve substantial energy consumption, and often exhibit limited overall remediation efficiency [3].

Relevance of the Study. Recent studies indicate that the most promising approach to the remediation of petroleum-contaminated soils is the application of integrated remediation technologies that combine mechanical recovery of the mobile free-phase petroleum products, physicochemical treatment methods, and thermal processing. Such integrated technological solutions provide substantially higher remediation efficiency than individual treatment methods and significantly reduce the time required for the restoration of contaminated sites [4]. However, the majority of published studies have focused on individual remediation techniques, including mechanical recovery, soil washing, bioremediation, thermal desorption, and chemical oxidation [5, 6]. Considerably less attention has been devoted to the comprehensive quantitative assessment of the performance of multistage remediation technologies, particularly with respect to environmental hazard reduction, contaminant migration potential, petroleum hydrocarbon mass balance, and integrated indicators of environmental performance.

A particularly important unresolved issue is the quantitative evaluation of the contribution of individual technological stages to the overall remediation outcome. In current practice, the effectiveness of accidental petroleum spill remediation is generally assessed only by comparing the final petroleum hydrocarbon concentrations in the treated soil. In contrast, the individual efficiencies of mechanical recovery, decantation, and vacuum distillation are rarely quantified separately. Consequently, this approach provides limited opportunities for optimizing remediation process design and selecting the most effective treatment technologies for specific engineering-geological and hydrogeological conditions.

Relationship to Scientific and Practical Challenges. This study presents the results of comprehensive field and laboratory investigations conducted at an oil storage facility in the urban-type settlement of Borodianka, Kyiv Region, Ukraine, following the accidental destruction of storage tanks containing light petroleum products. Unlike most previous studies, the present research encompasses the entire remediation process, from delineating the contaminated area and mathematically modeling the migration of light non-aqueous phase liquids (LPP) [7, 8] to the quantitative evaluation of an integrated remediation technology using a system of comprehensive environmental performance indicators. The objective of this study is to comprehensively evaluate the effectiveness of remediating soils contaminated by accidental spills of light petroleum products through the combined application of free-phase petroleum product recovery, decantation, and vacuum distillation, using a system of integrated environmental indicators that characterize the degree of contaminant removal, reduction of environmental risk, and mitigation of the potential for contaminant migration.

Literature Review. A wide range of methodological approaches has been developed for evaluating the effectiveness of petroleum-contaminated soil remediation. The most commonly applied assessment criteria include reductions in total petroleum hydrocarbon (TPH) concentrations, biodegradation rates, residual toxicity, environmental risk, and changes in the physicochemical properties of soils following remediation. More recently, increasing attention has been given to integrated assessment frameworks that combine technological, environmental, and economic performance criteria to provide a more comprehensive evaluation of remediation effectiveness [9,10]. Despite these advances, existing studies primarily assess the final remediation outcome rather than the effectiveness of individual technological stages. Furthermore, relatively few investigations quantify reductions in environmental hazard and contaminant migration potential while simultaneously evaluating the mass balance of recovered petroleum products. This gap limits objective comparisons among remediation technologies and complicates the optimization of integrated remediation strategies.

Research Gap. A major unresolved issue is the development of a comprehensive methodological framework for quantitatively assessing the effectiveness of petroleum-contaminated soil remediation based on a system of integrated performance indicators. Such indicators should simultaneously characterize contaminant removal efficiency, residual anthropogenic impact, environmental risk, and the potential for secondary contaminant migration.

To address this challenge, the present study proposes a comprehensive system for evaluating the performance of an integrated remediation technology combining free-phase petroleum product recovery, decantation, and vacuum distillation. The proposed framework incorporates the following key indicators: contamination reduction coefficient; residual contamination coefficient; environmental hazard coefficient; environmental risk reduction coefficient; integrated potential migration index; and mass balance of recovered petroleum products. Together, these indicators provide a comprehensive quantitative assessment of remediation performance and environmental effectiveness.

Scientific Novelty. This study presents, for the first time, a comprehensive methodological framework for evaluating the effectiveness of remediation of soils contaminated by accidental releases of light petroleum products. Unlike existing approaches, the proposed methodology is based on a system of integrated performance indicators that enables the simultaneous assessment of remediation efficiency, changes in environmen-

tal risk, residual anthropogenic impact, and the potential for contaminant migration. Furthermore, this study is the first to propose a unified set of interrelated quantitative indicators for evaluating an integrated remediation technology combining free-phase petroleum product recovery, decantation, and vacuum distillation. These indicators include the contamination reduction coefficient, residual contamination coefficient, environmental hazard coefficient, environmental risk reduction coefficient, integrated potential migration index, and the mass balance of recovered petroleum products. Collectively, they provide a scientifically robust and comprehensive framework for the quantitative evaluation of remediation performance and environmental effectiveness.

Materials and Methods. The experimental study was conducted at the territory of an oil storage facility located in the urban-type settlement of Borodianka, Kyiv Region, Ukraine, which was severely damaged during military operations in 2022. The destruction of the fuel storage tanks resulted in the accidental release of approximately 1,200 m^3 of light refined petroleum products (LRPPs), primarily gasoline and diesel fuel, leading to extensive contamination of the soil and the upper unconfined aquifer (Fig. 1).

The first stage of the investigation comprised an integrated program of field surveys, office-based analyses, and mechanical recovery of the mobile free-phase petroleum products. Field investigations included a reconnaissance survey of the contaminated site, geodetic positioning of observation points, drilling of nine exploratory boreholes (T1–T9), groundwater level measurements, field hydraulic tests using the bailer recovery method [8] (Fig. 2), and the collection of representative composite soil samples for laboratory analyses.

The office-based investigations involved a series of analytical calculations and numerical modeling procedures. In particular, the radius of LNAPL lens propagation was estimated using a simplified analytical multiphase flow model that accounted for both the spill volume and the average thickness of the free-product lens. Based on the calculated propagation radii, a spatial contamination model was developed to delineate the contaminated area, providing the basis for designing the mechanical recovery system for free-phase petroleum products (Fig. 3) [7].

Field investigations confirmed the formation of a localized petroleum contamination zone exceeding 4,000 m^2 in the central part of the oil storage facility. The spatial distribution of contaminants was primarily controlled by the soil grain-size composition, the characteristics of the artificially modified site topography, and the natural groundwater flow regime. Drilling of the obser-



Fig. 1. Fragments of the oil storage facility showing residual petroleum product contamination



Fig. 2. Observation boreholes containing free-phase petroleum products

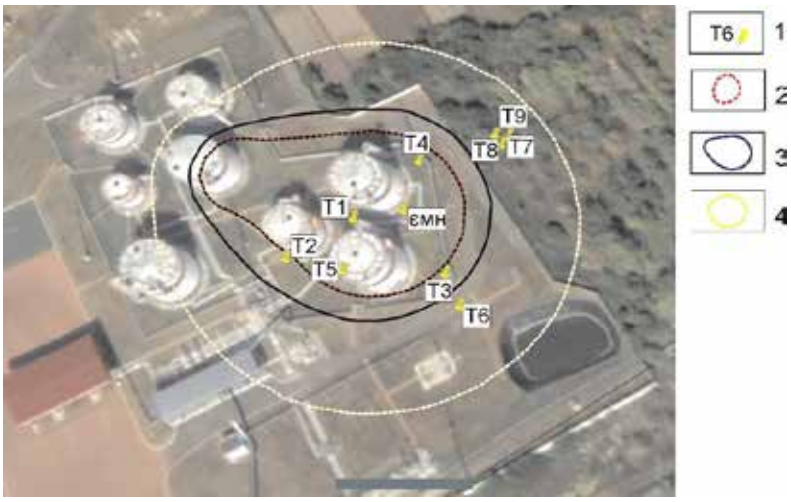


Fig. 3. Spatial approximation of the predicted distribution of petroleum products within the vadose zone, integrated with the coordinates of the observation boreholes and satellite imagery obtained from Google Earth

Legend: (1) field observation borehole; (2) contamination boundary corresponding to a free-product thickness of h_1 = 0.50 m; (3) contamination boundary corresponding to h_2 = 0.30 m; (4) contamination boundary corresponding to h_3 = 0.10 m.

vation boreholes confirmed the presence of a mobile light non-aqueous phase liquid (LNAPL) lens floating on the groundwater table. The thickness of the free-phase petroleum product varied from 0.10 to 0.50 m, depending on the distance from the damaged storage tanks. The maximum thicknesses were recorded within the central part of the spill area, in agreement with the results of the contaminant migration modeling.

Using the measured spill volume and the observed thickness of the free-product lens, the contaminated area was quantitatively estimated. The most probable extent of contamination was calculated to be 4,169 m², corresponding to an average LNAPL thickness of 0.30 m. The total volume of the mobile free-phase petroleum product was estimated at 1,250.7 m³, which closely matches the approximate spill volume determined during the engineering site assessment.

These findings provided the basis for designing the mechanical petroleum recovery system, determining the optimal number and spatial arrangement of recovery wells, and optimizing the subsequent remediation strategy.

The practical remediation of the contaminated site was implemented in two sequential stages. The first stage involved the mechanical recovery of the mobile free-phase petroleum products through the installation of 140 recovery wells with a total drilled length of 710 linear meters, followed by the extraction of the petroleum product–water mixture using the bailer recovery method. This initial mechanical recovery stage produced the most significant immediate environmental benefit. The average concentration of petroleum hydrocarbons in the soil decreased from 43,640 mg kg^{-1} to 18,760 mg kg^{-1}, corresponding to a reduction of approximately 57%.

Nevertheless, more than 42% of the initial contamination remained within the soil after mechanical recovery, indicating that this technique alone provides only limited remediation efficiency. These findings are consistent with previous international studies demonstrating that conventional mechanical recovery methods effectively remove only the mobile free-phase contaminants, whereas a substantial proportion of petroleum hydrocarbons remains adsorbed within the soil pore structure, requiring additional physicochemical treatment technologies for effective removal. This limitation provided the rationale for implementing a second remediation stage. The subsequent treatment involved a proprietary integrated remediation technology combining decantation and vacuum distillation. The primary objective of this stage was to remove the residual petroleum hydrocarbons adsorbed onto mineral soil particles that could not be extracted by mechanical recovery alone.

The treatment process consisted of several consecutive operations, including preliminary dispersion of the contaminated soil in an aqueous medium, intensive mixing of the resulting suspension, gravitational separation of the free petroleum phase by decantation, and the final removal of low-volatility hydrocarbon fractions by vacuum distillation under reduced pressure. Operating under vacuum significantly lowered the evaporation temperature of petroleum fractions, thereby reducing energy consumption while preventing thermal degradation of the mineral soil matrix.

To evaluate the performance of the proposed technology, five composite soil samples, each weighing 200 kg, were prepared to represent different contamination conditions across the study area. The total mass of the experimental material was 1,000 kg. Petroleum hydrocarbon concentrations were determined at three stages: prior to remediation, after mechanical recovery of the free-phase petroleum products, and following completion of the integrated remediation process.

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

The average concentration of petroleum hydrocarbons in the contaminated soil immediately after the accidental spill was 43,640 mg kg^{-1}. Following mechanical recovery using the bailer method, the average concentration decreased to 18,760 mg kg^{-1}. Subsequent treatment by the combined decantation and vacuum distillation process further reduced the concentration to 2,180 mg kg^{-1} (Table 1).

The highest residual contamination was observed at sampling point T4, which corresponded to the highest initial petroleum hydrocarbon concentration and was most likely, associated with deeper contaminant penetration into the sandy soil matrix.

The results demonstrate that the second technological stage removed more than 88% of the residual petroleum hydrocarbons remaining after the initial mechanical recovery process. These findings confirm that mechanical recovery is effective primarily for the removal of the mobile free-phase petroleum products, whereas the combined physicochemical treatment efficiently removes capillary-bound and adsorbed hydrocarbons retained within the soil matrix. A summary of the experimental results is presented in Table 2.

As shown in Table 2, the final remediation performance was achieved primarily through the sequential application of the two technological stages. This treatment strategy is consistent with current international approaches to the remediation of LNAPL-contaminated sites, where maximum remediation efficiency is achieved only through the application of integrated treatment technologies rather than individual remediation methods [11].

To comprehensively evaluate the performance of the proposed remediation technology, a system of integrated performance indicators was developed. The assessment framework included the contamination reduction coefficient, overall remediation efficiency, efficiency of individual technological stages, residual contamination coefficient, integrated potential migration hazard index, and the mass balance of recovered petroleum hydrocarbons. The experimental data were processed using standard methods of mathematical statistics.

The first performance criterion was the contamination reduction coefficient, which provides a quantitative measure of remediation efficiency and is defined as:

$$Kcr = \frac{C0}{C} \quad (1)$$

where: Kcr – is the contamination reduction coefficient; C0 – is the initial contaminant concentration; C – is the contaminant concentration after remediation.

Higher values of Kcr indicate greater environmental effectiveness of the remediation technology. Based on the experimental data,

$$Kcr = \frac{43640}{2180} \approx 20{,}02.$$

This result indicates that the petroleum hydrocarbon concentration in the soil decreased by more than twenty-fold following remediation.

The overall remediation efficiency was calculated using the conventional relationship:

$$\eta = \frac{C0 - C}{C0} 100\% \quad (2)$$

where: C0 – is the initial petroleum hydrocarbon concentration (mg kg^{-1}); C – is the concentration after remediation (mg kg^{-1}); η – (\eta) is the remediation efficiency (%).

Substituting the experimental values yields:

Table 1

Petroleum hydrocarbon concentrations in soil at different stages of the remediation process

Sampling point	After the spill, mg kg^{-1}	After mechanical recovery, mg kg^{-1}	After integrated remediation, mg kg^{-1}
T1	42000	18000	2100
T2	38500	16200	1850
T3	46700	20100	2300
T4	51200	22500	2700
T5	39800	17000	1950
Середнє значення	43640	18760	2180

Table 2

Changes in the average petroleum hydrocarbon concentration during the remediation process

Remediation stage	Concentration, mg kg^{-1}	Reduction relative to the initial concentration, %
Before remediation	43 640	-
After mechanical recovery	18 760	57,0
After decantation and vacuum distillation	2 180	95,0

$$\eta =. \frac{43640 - 2180}{43640} \times 100\% = 95{,}0\%.$$

Thus, the integrated remediation technology removed nearly the entire mass of light refined petroleum products from the contaminated soil. The achieved remediation efficiency exceeds that reported for most conventional remediation technologies, which typically range between 70% and 90%.

To assess the degree of residual contamination, the residual contamination coefficient was calculated using the following equation:

$$Kr = \frac{C}{C0} \quad (3)$$

where: Kr – is the residual contamination coefficient; C – is the petroleum

hydrocarbon concentration after remediation (mg kg^{-1}); C0 – is the initial petroleum hydrocarbon concentration before remediation (mg kg^{-1}).

Lower values of Kr indicate higher remediation efficiency. Based on the experimental data,

$$Kr = \frac{2180}{43640}\ 0{,}05.$$

This result indicates that only approximately 5% of the initial petroleum hydrocarbon content remained in the soil following completion of the remediation process.

To evaluate the environmental hazard associated with soil contamination, the environmental hazard coefficient (environmental risk coefficient) was calculated as:

$$R = \frac{C}{Cs} \quad (4)$$

where: R – is the environmental hazard coefficient; C is the measured contaminant concentration in the investigated medium; Cs - is the regulatory permissible concentration of the contaminant.

Using a regulatory threshold concentration of 1,000 mg kg^{-1}, the environmental hazard coefficient was R=43.64 before remediation and 2.18 after remediation. Thus, the potential environmental hazard of the contaminated site was reduced by more than twenty-fold following implementation of the integrated remediation technology.

Based on the calculated values of the environmental hazard coefficient, the contamination levels were classified according to the categories presented in Table 3.

Table 3

Environmental hazard classification based on the environmental hazard coefficient

Environmental hazard coefficient (R)	Hazard level
$R \leq 1$	Acceptable
$1 < R \leq 10$	Moderate
$10 < R \leq 100$	High
$R > 100$	Extremely high

To characterize the migration potential of petroleum contaminants, the migration hazard index was calculated as:

$$I_м = \frac{Cw}{Cs} \quad (5)$$

where: IM – is the migration hazard index; Cw – is the petroleum hydrocarbon

concentration in the aqueous extract; Cs – is the petroleum hydrocarbon concentration in the soil.

The calculated migration hazard index decreased from I_M = 436.4 before remediation to 21.8 after remediation. This substantial reduction indicates a marked decrease in the risk of groundwater contamination and the lateral migration of petroleum hydrocarbons beyond the boundaries of the accidental spill area. Consequently, the migration potential of the LNAPL within the vadose zone was reduced by nearly twenty-fold. Of particular significance is that this pronounced reduction was achieved primarily through the removal of adsorbed hydrocarbons, which constitute the greatest long-term threat to groundwater quality due to their persistence within the soil matrix. To further verify the technological performance of the proposed remediation process, a mass balance analysis was performed [12]. For the experimental soil batch with a total mass of 1,000 kg, the initial mass of petroleum hydrocarbons was 43.64 kg. Following completion of the remediation process, the residual hydrocarbon mass was reduced to 2.18 kg, indicating that 41.46 kg of petroleum hydrocarbons had been removed overall. Of this amount, approximately 24.9 kg was recovered during the mechanical extraction stage, whereas an additional 16.6 kg was removed during the combined decantation and vacuum distillation process. Consequently, the second technological stage accounted for nearly 40% of the total petroleum hydrocarbon removal (Table 4), despite treating only the residual, strongly adsorbed fraction of the contaminant.

These results demonstrate the high effectiveness of vacuum distillation as the final stage of the integrated remediation process.

Conclusions. An integrated framework for evaluating the effectiveness of remediation of petroleum-contaminated soils following accidental spills is proposed for the first time. The methodology is based on the combined application of a system of interrelated performance indicators, including the contamination reduction coefficient, residual contamination coefficient, environmental hazard coefficient, environmental hazard reduction factor, integrated migration hazard index, and petroleum hydrocarbon mass balance. Unlike existing assessment approaches, the proposed framework provides a comprehensive quantitative evaluation of both the technological and environmental performance of remediation and enables objective comparison of different remediation technologies using a unified set of evaluation criteria. The obtained results demonstrate that the effectiveness of petroleum-contaminated soil remediation depends

Table 4

Comprehensive evaluation of the integrated remediation technology

Indicator	Value
Initial petroleum hydrocarbon concentration	43 640 mg kg^{-1}
Residual petroleum hydrocarbon concentration	2 180 mg kg^{-1}
Overall remediation efficiency	95,0 %
Contamination reduction coefficient	20,02
Residual contamination coefficient	0,05
Environmental hazard reduction factor	20,02 fold
Total mass of recovered petroleum hydrocarbons	41,46 kg t^{-1} of soil
Mass removed by decantation and vacuum distillation	16,58 kg t^{-1} of soil

not only on the recovery of the free-phase light refined petroleum products (LRPPs), but also on the capability of the remediation technology to remove adsorbed and capillary-bound hydrocarbons, which represent the primary long-term source of secondary contamination of soils and groundwater. The field and laboratory investigations showed that mechanical recovery alone reduced the average petroleum hydrocarbon concentration only to 18,760 mg kg^{-1}, indicating that nearly 43% of the initial contaminant mass remained in the soil after completion of the first remediation stage.

The proposed integrated remediation technology reduced the average petroleum hydrocarbon concentration to 2,180 mg kg^{-1}, corresponding to an overall remediation efficiency of 95%. Unlike most previously published studies, the present work not only quantified the degree of contaminant removal but also performed a comprehensive assessment of environmental remediation performance using an integrated system of evaluation indicators. The contamination reduction coefficient reached 20.02, the residual contamination coefficient was 0.05, and the environmental hazard reduction factor also reached 20.02. The application of this integrated assessment framework makes it possible to evaluate remediation performance not only in terms of residual contaminant concentrations but also with respect to the potential for contaminant migration and its associated environmental impacts.

The petroleum hydrocarbon mass balance demonstrated that, of the initial 43.64 kg of petroleum hydrocarbons contained in one metric tonne of contaminated soil, only 2.18 kg remained after completion of all remediation stages. The total amount of petroleum hydrocarbons removed was 41.46 kg, of which 16.58 kg was recovered during the decantation and vacuum distillation stage. Consequently, the second technological stage contributed approximately 40% of the overall remediation efficiency, despite targeting only the residual, strongly sorbed fraction of petroleum hydrocarbons. This finding highlights the critical role of physicochemical treatment in achieving high remediation efficiency and minimizing the long-term environmental risks associated with residual petroleum contamination.

Practical Implications. The proposed methodology and the obtained results can be applied in the design and implementation of remediation projects addressing accidental petroleum spills at fuel and energy infrastructure facilities, transportation hubs, oil storage terminals, filling stations, fuel storage depots, and other potentially hazardous industrial sites. Furthermore, the proposed integrated assessment framework may serve as a scientific basis for the development of sector-specific technical guidelines, regulatory documents governing the evaluation of petroleum-contaminated soil remediation, and environmental audit procedures for sites affected by accidental petroleum spills.

References

1. Bryks, A.L., & Ohnyanyk, M.S. Aspects of the management of petroleum-contaminated geological environments. Geological Journal, 3(380), 2022. – P.18–33. https://doi.org/10.30836/igs.10256814.2022.3.25860.
2. Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. (2024). Green Deal. Interfax-Ukraine. Available at: https://interfax.com.ua/news/greendeal/907725.html (accessed 9 May 2024).
3. Nikolsky, V., Oliynyk, O., Shvachka, A., & Nachovnyy, I. Thermal treatment of concentrated liquid toxic waste and automatic control of process efficiency. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(10 (89), 2017. – 26–31. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.111846.
4. Yulin Zou, Yuanyuan Hu, Sicheng Li, Xiaojia Huang, Xiaowei Cheng, Weibin Pan. Remediation of crude oil contaminated soil through an integrated biological-chemical-biological strategy. *Science of The Total Environment*, V. 919, 2024, 170756. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170756.
5. Sakari Halmemie, Siri Gröndah, Mika Arffman, Keijo Nenonen, Tuula Tuhkanen. Vacuum extraction based response equipment for recovery of fresh fuel spills from soil. *Journal of Hazardous Materials*. V. 97, Issues 1–3, 2003. - P. 127-143. https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00249-2

6. Soroka, M.L., & Yaryshkina, L.A. Technology for remediation of oil spills based on the preliminary accumulation of sorbents within spill occurrence and localization zones. Science and Transport Progress, 42, 2012. – P. 45–55. https://doi.org/10.15802/stp2012/9275.
7. Boiko K.E., Diachenko N.O., Ulytsky O.A., Sokolov A.V. Assessment of accidental penetration of petroleum products into the geological environment and scientific substantiation of minimizing negative changes. *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, November 2023, Kyiv, Ukraine. T.2023 P. 1-5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520019.
8. Ulytskyi, O., Diachenko, N., Sokolov, A., & Serdiukova, O. Studies of oil product pollution in the aeration zone by mathematical modeling. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series «Geology. Geography. Ecology*", 59. 2023. – P. 44-54 https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-04.
9. Bzhwen Khalid Majeed, Dler M.S Shwan, Khasraw Abdullah Rashid. A review on environmental contamination of petroleum hydrocarbons, its effects and remediation approaches. *Environ. Sci.: Processes Impacts*, 2025, 27 (3): 526–548. https://doi.org/10.1039/d4em00548a.
10. Kwon, J. H., Ji, M. K., Kumar, R., Islam, M. M., Khan, M. A., Park, Y. K., and others. Recent advancement in enhanced soil flushing for remediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil: a state-of-the-art review. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 22(3), 2023. – P. 679-714. https://doi.org/10.1007/s11157-023-09657-0.
11. Kaveh Sookhak Lari, John L. Rayner, Greg B. Davis Towards characterizing LNAPL remediation endpoints. *Journal of Environmental Management*. V. 224, 2018, - P 97-105. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.041
12. ITRC (Interstate Technology & Regulatory Council). LNAPL Site Management: LCSM Evolution, Decision Process, and Remedial Technologies. LNAPL-3. Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council. LNAPL Update Team. 2018. URL: https://lnapl-3.itrcweb.org.

Література

1. Брикс А.Л., Огняник М.С. Аспекти поводження із забрудненими нафтопродуктами ділянками геологічного середовища. *Геологічний журнал*, № 3 (380), 2022. - С. 18–33. https://doi.org/10.30836/igs.10256814.2022.3.25860.
2. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України, оф. Сайт. Green Deal. Interfax Україна. URL: https://interfax.com.ua/news/greendeal/907725.html (дата звернення 9.05.24).
3. Nikolsky, V., Oliynyk, O., Shvachka, A., & Nachovnyy, I. Thermal treatment of concentrated liquid toxic waste and automatic control of process efficiency. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(10 (89), 2017. – 26–31. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.111846
4. Yulin Zou, Yuanyuan Hu, Sicheng Li, Xiaojia Huang, Xiaowei Cheng, Weibin Pan. Remediation of crude oil contaminated soil through an integrated biological-chemical-biological strategy. *Science of The Total Environment*, V. 919, 2024, 170756. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170756.
5. Sakari Halmemie, Siri Gröndah, Mika Arffman, Keijo Nenonen, Tuula Tuhkanen. Vacuum extraction based response equipment for recovery of fresh fuel spills from soil. *Journal of Hazardous Materials*. V. 97, Issues 1–3, 2003. P. 127-143. https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00249-2
6. Сорока, М.Л., Яришкіна, Л.А. Технологія очищення від розливів нафти, що передбачає попереднє накопичення сорбентів у зоні виникнення та локалізації розливів нафти. *Наука та транспортний прогрес*, № 42, 2012. – С. 45–55. https://doi.org/10.15802/stp2012/9275.
7. Boiko K.E., Diachenko N.O., Ulytsky O.A., Sokolov A.V. Assessment of accidental penetration of petroleum products into the geological environment and scientific substantiation of minimizing negative changes. *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, November 2023, Kyiv, Ukraine. T.2023 P. 1-5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520019.
8. Улицький О., Д'яченко Н., Соколов А., Сердюкова О. Математичне моделювання при оцінці забруднення зони аерації нафтопродуктами в умовах надзвичайної ситуації. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology". Вип. 59, 2023. – 44-54. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-04
9. Bzhwen Khalid Majeed, Dler M.S Shwan, Khasraw Abdullah Rashid. A review on environmental contamination of petroleum hydrocarbons, its effects and remediation approaches. *Environ. Sci.: Processes Impacts*, 2025, 27 (3): 526–548. https://doi.org/10.1039/d4em00548a.
10. Kwon, J. H., Ji, M. K., Kumar, R., Islam, M. M., Khan, M. A., Park, Y. K., and others. Recent advancement in enhanced soil flushing for remediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil: a state-of-the-art review. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 22(3), 2023. – P. 679-714. https://doi.org/10.1007/s11157-023-09657-0.
11. Kaveh Sookhak Lari, John L. Rayner, Greg B. Davis Towards characterizing LNAPL remediation endpoints. *Journal of Environmental Management*. V. 224, 2018, - P 97-105. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.041
12. ITRC (Interstate Technology & Regulatory Council). 2018. LNAPL Site Management: LCSM Evolution, Decision Process, and Remedial Technologies. LNAPL-3. Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council. LNAPL Update Team. URL: https://lnapl-3.itrcweb.org. (дата звернення 19.03.26).

Дата першого надходження статті до видання: 27.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

УДК 504.75:574
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.11

ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНОГО РИЗИКУ ЗАБРУДНЕННЯ СВИНЦЕМ ҐРУНТІВ, ПРИЛЕГЛИХ ДО АВТОДОРІГ, ТЕРИТОРІЙ РІЗНОГО ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Яковишина Т.Ф. (orcid.org/0000-0002-5924-7847),
Москальов М.О. (orcid.org/0009-0004-4482-3508)
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, м. Дніпро
t_yakovyshyna@ukr.net, Moskalov.M.O@nmu.one

Робота присвячена оцінюванню екологічного ризику внаслідок забруднення свинцем ґрунтів, прилеглих до автодоріг, територій різного функціонального призначення за умов тривалого впливу автотранспорту. Встановлено, що незважаючи на більш ніж 20-річну заборону використання бензину, який містить в якості присадки тетраетилсвинець, забруднення ґрунтів цим важким металом в межах автомобільних доріг досить значне, особливо за рухомими формами, і відповідає сильному та небезпечному рівню. Виявлено, що висока рухомість свинцю в ґрунті зумовила невідповідність при визначенні категорій забруднення за валовим вмістом і рухомими формами, що є принциповим при встановленні екологічної небезпеки та може призвести до невірних рішень при обранні методів ремедіації. Запропоновано залучення в загально прийняту систему оцінювання забруднення свинцем ґрунту додаткових показників – коефіцієнту біогеохімічної рухомості та можливого накопичення свинцю в крові дітей ln(PbB) для урахуванням спрямованості негативного впливу залежно від характеру використання територій, як то агроценоз чи урбоекосистема. Доведено, що найбільш небезпечне потрапляння свинцю в організм людини зафіксовано при ковтанні, порівняно з диханням та через шкіру. Спричинений екологічний ризик був умовно прийнятним при розповсюдженні забруднення по території сільськогосподарських угідь та умовно прийнятним при відсутності заходів з окультурення для ґрунтів урбоекосистеми. Уточнено рівень екологічного ризику для різних функціональних зон, а саме, для урбоекосистем шляхом встановлення прогнозованого вмісту свинцю в крові дітей та для земель сільськогосподарського призначення через надходження рухомих форм в товарну частину продукції рослинництва. *Ключові слова*: екологічна небезпека, екологічний ризик, свинець, ґрунт, забруднення, оцінювання, валовий вміст, рухомі форми.

Ecological risk assessment of lead pollution of highway areas soils with various functional purposes. Yakovyshyna T., Moskalov M.

The work has been devoted to the assessment of the ecological risk due to lead pollution for soils near highway areas of the various functional purposes under conditions of prolonged exposure to motor vehicles. The soil pollution with this heavy metal has been established as a quite significant, especially in available forms, and has been corresponded to a strong and dangerous level of pollution, that despite the more than 20-year ban on the use of gasoline containing tetraethyl lead as an additive. It has been found that the high mobility of lead in the soil caused irreversibility in determining the categories of pollution by gross content and available forms, which is fundamental in establishing ecological hazards and can lead to incorrect decisions when choosing remediation methods. The coefficient of biogeochemical mobility and the possible accumulation of lead in the blood of children ln(PbB) have been proposed to include in the generally accepted system, as additional indicators, for assessing soil lead contamination to take into account the direction of the negative impact depending on the nature of the use of territories, such as agrocenosis or urban ecosystem. The most dangerous way for lead has been proven to enter the human body is by ingestion, compared to breathing and through the skin. The resulting ecological risk has been acceptable when contamination spread across agricultural land and conditionally acceptable risk in the absence of cultivation measures for urban ecosystem soils. The level of ecological risk has been specified for various functional zones, namely for urban ecosystems by establishing the predicted lead content in children's blood and for agricultural lands due to the entry of mobile forms into the marketable part of crop production. *Key words:* ecological hazard, ecological risk, lead, soil, pollution, assessment, gross content, available forms.

Постановка проблеми. Згідно останніх змін від 23.01.2024 р. до Постанови Кабінету Міністрів України № 927 від 01.08.2013 р. «Про затвердження Технічного регламенту щодо вимог до автомобільних бензинів, дизельного, суднових та котельних палив» забороняється використання в автомобільних бензинах екологічних класів Євро3, Євро4 та Євро5 добавок (присадок), що мають у своєму складі хоча б один з таких компонентів: фосфор, сполуки свинцю та заліза, ароматичні аміни (монометиланіліни, моноетиланіліни тощо). Проте досить тривалий час, а саме починаючи з 1921 року, тетраетилсвинець використовувався як антидетонаційна присадка для підвищення октанового числа в бензині. Через високу токсичність важкого металу, його здатність

© Яковишина Т.Ф., Москальов М.О., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

негативно позначатися на організмі людини шляхом ураження нервової системи, порушення функції мозку, зниження імунітету, канцеро- та тератогенезу, бензин із додаванням тетраетилсвинцю був заборонений в США з 1996 року, в ЄС – з 2001 року, а до 2020-2021 років весь світ остаточно відмовився від цього пального. Європейські країни активно переходять на бензин з біоетанолом, приміром, Е10, що є частиною стратегії сталого розвитку відносно зниження викидів CO_2 в навколишнє середовище та залежності від нафти. В майбутньому країни ЄС в межах зеленої угоди планують до 2035 року при здійсненні пасажирських перевезень поступово взагалі відмовитись від автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння. І хоча використання бензину, який містить в якості присадки тетраетилсвинець давно припинено, однак тривала експлуатація доріг за умов інтенсивного руху автотранспорту призвели до надходження і значного накопичення цього важкого металу в ґрунтах прилеглих територій, що, в свою чергу, призвело до утворення джерела екологічної небезпеки незалежно від їх функціонального призначення, як то міжнародні магістралі, перетинаючі сільськогосподарські та лісові угіддя чи щільна дорожня мережа в середмісті. Тому виникла потреба в оцінюванні ступеня екологічного ризику для людини і довкілля внаслідок забруднення свинцем ґрунтів прилеглих територій.

Актуальність дослідження. Тривала експлуатація автодоріг за умов використання етильованого бензину призвела до формування лінійних осередків забруднення на територіях різного функціонального призначення Усвідомлення екологічної небезпеки і подальша його заборона, на жаль, не вирішує проблему вже існуючого забруднення свинцем ґрунтів, яке за свідченням [1-2] може значно перевищувати природний геохімічний фон та значення ГДК цього елементу, що характерно для багатьох країн світу. Відносно Директиви ЄС 2025/2360 для підвищення стійкості такі ґрунти потребують впровадження заходів з ремедіації, але для їх розробки першочерговим є проведення всебічного оцінювання ступеня екологічної небезпеки для людини і довкілля, пов'язаних з напрямами їх використання. І тут окрім застосування загального підходу щодо нормування забруднення за ГДК та фоновою концентрацією слід звернути увагу на його теперішнє і подальше використання, що дасть можливість більш чітко окреслити рівень небезпеки та спричинених екологічних ризиків, а отже обрати методи для відновлення забруднених ґрунтів. Приміром, для агроценозів має сенс додатково звертати увагу на транслокацію свинцю в сільськогосподарські культури, в той час як для ґрунтів урбоекосистем – на ступінь їх порушення, пилення і здатність потрапляти в організм людини. Розуміння ступеня небезпеки та можливих екологічних ризиків буде впливати не тільки на вибір технології відновлення, а й сприятиме більш ефективному користуванню земельними ресурсами шляхом вибору толерантних до забруднення сільськогосподарських культур або в окремих випадках зміни функціонального використання території для забезпечення екологічної безпеки та сталого розвитку.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження проведено у рамках реалізації Закону України «Про основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року» (розпорядження Кабінету Міністрів України від 28.02.2019 р.); Стратегії розвитку сфери інноваційної діяльності на період до 2030 (розпорядження Кабінету Міністрів України від 10.07.2019 № 526); Указу Президента України № 722 від 30.09.2019 «Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року» (цілі 9 – інновації та інфраструктура,11 – забезпечення відкритості, безпеки, життєстійкості й екологічної стійкості міст та інших населених пунктів, 15 – збереження екосистем суші); імплементованої в Україні Директиви ЄС 2025/2360 про моніторинг та стійкість ґрунтів; під час виконання у Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» НДР «Інноваційні технології захисту довкілля для забезпечення екологічної безпеки техногенно-навантажених регіонів» (державний реєстраційний номер 0124U002506, 2024-2027 рр.).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В роботах [3-4] встановлена позитивна кореляція між добовим транспортним навантаженням на автомагістраль та концентрацією важких металів у ґрунтах поблизу неї. Вважається, що зменшення валового вмісту важких металів у ґрунтах повинно відбуватися по мірі віддалення від дороги [5], проте такий зв'язок не завжди прослідкується по свинцю [6], що, в свою чергу, зумовлюється функціональним використанням території, особливо коли це стосується сільськогосподарської діяльності, окультуренням, ступенем трансформації ґрунтів, накладання інших джерел забруднення, наявністю рослинності, проведенням природоохоронних заходів тощо. Накопичення свинцю в ґрунтах прилеглих до автомобільних доріг зумовлює значні ризики для організму людини як безпосередньо так і через трофічний ланцюг [7]. Тому констатації самого факту забруднення шляхом виявлення перевищення природного геохімічного фону та ГДК замало. Виникає потреба врахування функціонального використання територій поблизу доріг при оцінюванні екологічних ризиків [8], що виникли в результаті забруднення, приміром, здатності до мігрування [9] та накопичення рослинами агроценозу при забрудненні сільськогосподарських угідь, а в межах урбоекосистеми – через потрапляння до організму людини [10] з можливим проявом канцерогенних ефектів.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Проблема дослідження полягає в обґрунтуванні оцінювання екологічного ризику внаслідок забруднення свинцем ґрунтів з урахуванням його рухомості та функціонального використання територій, прилеглих до автодоріг за умов тривалого впливу автотранспорту.

Новизна. Виявлено невідповідність ступеня екологічної небезпеки забруднення свинцем ґрунтів при оцінюванні за валовим вмістом металу та за рухомими формами, що підтверджувалось перевищенням вмісту Pb ГДК в товарній частині сільськогосподарських культур для агроценозу та умовно неприйнятним екологічним канцерогенним ризиком TCR. Науково обґрунтовано залучення додаткових показників – коефіцієнту біогеохімічної рухомості ($К_{бгхр}$) та можливого накопичення свинцю в крові дітей ln(PbB) в систему оцінювання для урахуванням спрямованості негативного впливу залежно від характеру використання територій, як то агроценоз чи урбоекосистема.

Методологічне або загальнонаукове значення. Проби ґрунту для визначення вмісту свинцю відбирали з різних функціональних зон, прилеглих до автодоріг, що відрізнялись за категоріями: 1 – бульвар вздовж проспекту ім. Дмитра Яворницького у м. Дніпро; 2 – зелена зона на виїзді з м. Дніпро за житловим масивом Тополя 3, автомобільна дорога Н-08; 3 – сільськогосподарські угіддя навколо об'їздної дороги селища Добровеличківка Новоукраїнського району Кіровоградської області. Ґрунт був представлений чорноземом звичайним різного ступеня трансформації, внаслідок безпосередньо будівництва дороги, що зазнав додаткового антропогенного впливу різного за характером, а саме: в першому і другому випадках через осідання забруднюючих речовин, що містяться у викидах промислових підприємств, і використання протиожеледних реагентів; а в третьому – при застосуванні агрохімікатів.

Валовий вміст свинцю в ґрунті визначали після його кислотної обробки на атомно-абсорбційному спектрофотометрі, рухомі форми, що показували здатність сполук важкого металу до мігрування і накопичення в рослинах – у витягу ААБ з pH 4,8.

Ступінь забруднення ґрунту Pb з урахуванням його рухомості оцінювали за коефіцієнтом концентрації ($С_f$), за формулою (1), та шкалою з табл. 1:

$$С_f = \frac{С_i}{С_ф} \quad (1)$$

де Сі – концентрація свинцю (валовий вміст/рухомі форми) в досліджуваному ґрунті (мг/кг); Сф – природний геохімічний фон свинцю в зональному ґрунті для валового вмісту/рухомих форм відповідно (мг/кг).

Екологічну небезпеку забруднення ґрунтів свинцем встановлювали за ГДК, розраховуючи коефіцієнт небезпеки ($К_{нб}$) для валового вмісту і рухомих форм за формулою (2) з подальшим нормуванням за табл. 2:

$$К_{нб} = \frac{С_i}{ГДК_i} \geq 1 \quad (2)$$

де Сі – концентрація свинцю (валовий вміст/рухомі форми) в ґрунті, мг/кг; ГДКі – гранично допустима концентрація свинцю (валовий вміст/рухомі форми) в ґрунті, мг/кг.

Таблиця 1

Шкала інтенсивності забруднення свинцем ґрунтів відносно природного геохімічного фону

Категорія інтенсивності забруднення	Коефіцієнт концентрації ($С_f$)	
	1	2
Природна флуктуація вмісту металів	< 5,0	< 1,0
Слабке забруднення	5,1-10,0	1,1-2,0
Помірне забруднення	10,1-30,0	2,1-6,0
Сильне забруднення	> 30,0	> 6,0

Примітка: 1 – за даними емісійної спектроскопії; 2 – за середнім значенням концентрації катіонів металів, вилучених ААБ з pH 4,8.

Таблиця 2

Нормування забруднення ґрунтів свинцем за перевищенням ГДК

Рівень забруднення	Значення коефіцієнту небезпеки	
	за витягом ААБ з pH 4,8	після кислотної обробки ґрунту
Безпечний	Фон	< 1 ГДК
Толерантний	> фону – < ГДК	1-2 ГДК
Помірно небезпечний	> ГДК – < 2 ГДК	2-5 ГДК
Небезпечний	> 2 ГДК	> 5 ГДК

Для оцінювання впливу процесу техногенезу, як прояву фактору антропогенної діяльності на накопичення свинцю в ґрунті визначали частку техногенності металу (ЧТМ) згідно S. Baron за формулою (4):

$$ЧТМ = 100 \cdot \left[\left(КЗМ - 1 \right) / КЗМ \right] \quad (4)$$

де КЗМ – коефіцієнт збагачення ґрунту свинцем, який розраховували за формулою (5) до стабільного елементу – алюмінію:

$$КЗМ = \left[\left(ВМ_{верх.\ гор} / Al_{верх.\ гор} \right) / \left(ВМ_{нижн.\ гор} / Al_{нижн.\ гор} \right) \right] \quad (6)$$

де ВМверх.гор та ВМнижн.гор – валовий вміст свинцю в ґрунті, мг/кг; Alверх.гор та Alнижн. гор – валовий вміст алюмінію відповідно у верхньому і нижньому горизонті, мг/кг.

Техногенність вважали високою за умов ЧТМ > 75%; середньою – в межах 50% < ЧТМ < 75%; низькою і недостовірною при ЧТЗ < 50%.

Спричинений екологічний ризик для людини внаслідок забруднення ґрунту свинцем оцінювали з урахуванням його токсичності та шляхів надходження до організму за протоколом USEPA [11-13].

Фактор екологічного ризику (E_r) визначали за методикою L. Hakanson з урахуванням токсичності свинцю за формулою (7)

$$E_r = T_r \cdot C_f \quad (7)$$

де Tr – токсико-відповідь на хімічний елемент, яка враховує його небезпеку, для свинцю дорівнює 5; Cf – коефіцієнт концентрації важкого металу, розрахований за формулою (1).

Нормування Er здійснювали за M. El-Bady (2014), а саме: $E_r < 40$ – низький, $40 \le E_r < 80$ – помірний, $80 \le E_r < 160$ – значний, $160 \le E_r < 320$ – високий, $E_r > 320$ – дуже високий.

Згідно протоколу USEPA [11-13] спочатку розраховували середнє добове надходження свинцю з урахуванням трьох шляхів при ковтанні, вдиханні та через шкіру за формулами (8-10), розшифровку та значення параметрів яких наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Значення параметрів у рівняннях екологічного ризику за протоколом USEPA

Пара-метр	Пояснення	Дорослі	Одиниця виміру
CDI	Середнє добове надходження хімічних елементів/речовин в організм людини через 3 шляхи впливу	–	–
C_i	Концентрація канцерогенних елементів/речовин у ґрунті	–	мг/кг
IRg	Винос канцерогенних елементів/речовин з ґрунту організмом людини	100	мг/добу
IRh	Частота дихання людини за одну добу	14,5	$м^3$/добу
CF	Коефіцієнт приведення	1×10^{-6}	кг/мг
EF	Частота впливу протягом одного року	365	діб у рік
ED	Середня тривалість експозиції	70	роки
BW	Середня маса тіла	60	кг
AT	Середній час (не канцерогенний)	ED×365	доба
	Середній час (канцерогенний)	70×365	
FSPO	Частка твердих частинок ґрунту, що знаходиться у повітрі	0,15	–
PLAF	Швидкість утримання твердих частинок ґрунту при вдиханні	0,75	–
PM_{10}	Кількість частинок, що вдихаються	0,15	мг/м
Пара-метр	Пояснення	Дорослі	Одиниця виміру
SA	Відкрита поверхня шкіри	0,54	$м^2$
AF	Фактор прилипання часток на шкірі	0,07	мг/($см^2$× добу)
ABS	Фактор поглинання часток шкірою	0,001	–
RfD_{ing}	Референтна доза при ковтанні	$3{,}50 \times 10^{-3}$	мг/(кг× добу)
RfD_{derm}	Референтна доза при потраплянні через шкіру	$3{,}52 \times 10^{-3}$	мг/(кг× добу)
RfD_{inh}	Референтна доза при вдиханні	$5{,}25 \times 10^{-3}$	мг/(кг× добу)
CF_{ing}	Фактор уточнення	$8{,}5 \cdot 10^{-3}$	–
CF_{inh}	Фактор уточнення	$4{,}2 \cdot 10^{-2}$	–
CF_{derm}	Фактор уточнення	–	–
HQ	Екологічний неканцерогенний ризик за шляхом надходження	–	–
HI	Загальний екологічний неканцерогенний ризик	–	–
CR	Екологічний канцерогенний ризик за шляхом надходження	–	–
TCR	Загальний екологічний канцерогенний ризик	–	–

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

$$CDI_{a-ing} = \frac{C_i \times IRg \times CF \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (8)$$

$$CDI_{a-inh} = \frac{C_i \times IRh \times CF \times EF \times ED \times FSPO \times PLAF \times PM_{10}}{BW \times AT} \quad (9)$$

$$CDI_{a-derm} = \frac{C_i \times CF \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (10)$$

Екологічний ризик визначали, як неканцерогенний за формулою (11) та канцерогенний – за формулою (12):

$$HI = \sum HQ_i = \sum \frac{CDI_i}{RfD_i} \quad (11)$$

$$TCR = \sum CR = \sum CDI_i \cdot SF_i \quad (12)$$

Нормування екологічного канцерогенного ризику проводили використовуючи рекомендації [14] та критерії прийнятності Ешбі: $>10^{-3}$ – високий; 10^{-3} – 10^{-4} – середній; 10^{-4} – 10^{-6} – низький (умовно прийнятний); $<10^{-6}$ – мінімальний (прийнятний); а екологічний неканцерогенний ризик визначали як не суттєвий при HI < 1.

Додатково оцінювали супутні показники екологічної небезпеки внаслідок забруднення ґрунтів свинцем:

1) для агроценозу – $К_{бгхр}$, який показує актуальну доступність цього важкого металу для рослин за формулою (12)

$$K_{бгхр} = C_{росл} / C_{i\,(рух.форми)} \quad (12)$$

де Сбгхр – вміст свинцю в рослині, мг/кг; Сі (рух. форми) – вміст рухомих форм свинцю в ґрунті, мг/кг.

2) для м. Дніпро – можливе накопичення свинцю в крові дітей ln(PbB) за формулою згідно методики CDC (13)

$$\ln(PbB) = 0,879 + 0,241 \cdot \ln(PbS) \quad (13)$$

де PbS – валовий вміст свинцю в ґрунті, млн[1].

Викладення основного матеріалу. Накопичення свинцю ґрунтами територій, прилеглих до автодоріг, залежало від полосносності дороги, щільності та структури транспортного потоку, тривалості використання в межах функціонального призначення. Валовий вміст перевищував природний геохімічний фон чорнозему звичайного та ГДК в 1,73-8,11 і 1,30-6,05 рази відповідно, в найменшій мірі на ділянці, представленій сільськогосподарськими угіддями навколо об'їздної дороги, та найбільше – у міському ґрунті зеленої зони, що зумовлено тривалим транспортним навантаженням на виїзді з м. Дніпро (табл. 4). Відносно бульвару вздовж проспекту ім. Дмитра Яворницького слід брати до уваги, що щільна забудова різко знижує швидкість вітру, а це, в свою чергу, призводило до осадження аерозолів свинцю в межах житлових кварталів.

Звертає на себе увага високого рівня рухомості свинцю в порушених міських ґрунтах, які хоча й сформувалися на тлі зональних – чорноземів звичайних, проте більшою частиною втратили запас буферної здатності і не в змозі блокувати цей забруднювач та запобігати його міграції в урбоекоекосистемі особливо за умов коли свинець надходить у формі легкорозчинних сполук. Вміст рухомих форм свинцю (витяг ААБ 4,8) становив 10,90-22,07 мг/кг, що вище фонового значення на декілька порядків. Підвищення рухомості свинцю в ґрунті агроценозу гальмувалося за рахунок інтенсивного використання органічних добрив, а отже, зв'язування катіону Pb^{2+} в складні органічні комплекси на тлі високої буферної здатності окультуреного ґрунту і становило 4,21 мг/кг.

Таблиця 4

Чинники екологічного ризику забруднення свинцем ґрунтів різного функціонального призначення внаслідок тривалого впливу автотранспорту

Чинник	Функціональних зон, прилеглих до автодоріг		
	1	2	3
Валовий вміст Pb, мг/кг	48,27	181,59	38,86
Рухомі форми Pb, мг/кг	10,90	22,07	4,21
$С_f$ за валовим вмістом	2,15	8,11	1,73
$С_f$ за рухомими формами	109,00	220,70	42,1
$К_{нб}$ за валовим вмістом	1,61	6,05	1,30
$К_{нб}$ за рухомими формами	5,45	11,04	2,11
КЗМ	2,97	11,19	2,39
ЧТМ	66,46	91,06	58,33
$Е_r$	10,75	40,6	8,65
HI	$2,31 \cdot 10^{-2}$	$8,69 \cdot 10^{-2}$	$1,86 \cdot 10^{-2}$
TCR	$9,37 \cdot 10^{-7}$	$3,53 \cdot 10^{-6}$	$7,55 \cdot 10^{-7}$
$К_{бгхр}$	–	–	0,52-1,43
ln(PbB)	1,81	2,13	–

Згідно коефіцієнту концентрації ступінь забруднення ґрунту свинцем за валовим вмістом можна віднести до слабкого тільки на виїзді з м. Дніпро, в решті випадків – норма, в той час як за рухомими формами – до сильного рівня забруднення. Аналогічна ситуація спостерігалась і відповідно коефіцієнту небезпеки, так для валового вмісту рівень забруднення був помірно небезпечним та небезпечним, проте відносно рухомих форм – небезпечним (табл. 4). Зазвичай при встановленні забруднення і визначенні ступеня екологічної небезпеки звертають увагу тільки на валовий вміст, проте він є досить загальним і іноді малоінформативним, особливо для визначення методу з ремедеації ґрунтів, адже не надає розуміння про поведінку забруднювача, його здатність до накопичення рослинами та мігрування вздовж ґрунтового профілю, створюючи передумови вторинного забруднення при потраплянні в ґрунтові води. Проведені розрахунки чітко показали категоріальну невідповідність результатів оцінювання, що в свою чергу може призвести до прийняття помилкових рішень при встановленні ступеня екологічної небезпеки. Особливо це стосується чорноземних ґрунтів, яким в нативних умовах притаманна рухомість до 0,5% від валового вмісту завдяки значного запасу буферної здатності, в той час як порушені в результаті будівництва міські ґрунти нею майже не володіють, що чітко показує коефіцієнт концентрації для рухомих форм.

Високий ступень забруднення досліджуваних ґрунтів підтверджували розрахунки коефіцієнтів збагачення та техногенності свинцю відносно стабільного алюмінію, остання була для територій, прилеглих до автодоріг середньою та високою. Відносно сільськогосподарських угідь це пояснювалось не стільки тривалістю впливу, скільки систематичним перемішуванням в межах орного шару та процесами деконцентрації в ньому. В чорноземних ґрунтах навіть за умов їх трансформації накопичення важких металів при аерогенному надходженні забруднення рідко розповсюджується вниз по ґрунтовому профілю особливо в умовах високого вмісту карбонатів та непромивного водного режиму, який є характерним для Північного Степу України.

Ступень екологічної небезпеки внаслідок поглинання важкого металу сільськогосподарськими культурами відбивав коефіцієнт біогеохімічної рухомості, який був розрахований відносно наявності доступного свинцю для рослин. Одержані значення $К_{бгхр}$ свідчили про високу вірогідність надходження токсиканту до товарної частини сільськогосподарських культур, що підтверджувалось його вмістом в зерні ярих та озимих зернових 1,1-2,1 ГДК залежно відстані від дороги. Нажаль в Україні до сих пір існує негативна практика розміщувати сільськогосподарські угіддя безпосередньо в зоні впливу автодоріг, що призводе до отримання екологічно небезпечної продукції рослинництва.

Наявність різних рівнів забруднення за валовим вмістом з врахуванням ступеня небезпеки згідно токсико-відповідді впливу елементу на здоров'я людей зумовлювало як відсутність так і низький екологічний ризик – $Е_r$ в зеленій зоні на виїзді з міста (табл. 4). Низьке значення $Е_r$ зумовлювалось втручанням людини щодо відновлення екологічних функцій ґрунту, як то родючість та буферність з подальшим створенням стійкого фітоценозу. В подальшому при аналізі шляхів надходження токсиканту до організму людини їх було розташовано в наступній послідовності за ступенем спричинення екологічної небезпеки: при ковтанні > через шкіру = при диханні. Екологічний неканцерогенний ризик – HI в результаті забруднення ґрунтів свинцем був несуттєвим, а саме таким, що не в змозі призвести до стійких негативних ефектів в організмі людини. Екологічний канцерогенний ризик TCR межував на рівні прийнятний/умовно неприйнятний, що, по-перше, потребує моніторингу та проведення своєчасних заходів ремедіації, а, по-друге, слід розуміти що забруднення свинцем ґрунтів, це тільки один чинник, який здійснює свій вплив на екологічну ситуацію в межах міста. При врахуванні екологічного ризику за іншими чинниками згідно з підходом запропонованим USEPA це призведе до значного підвищення екологічної небезпеки для населення в межах урбоекосистеми.

Відомо, що між здоров'ям людини та якістю навколишнього середовища існує тісний зв'язок, особливо відносно показників рівня смертності та кількості онкозахворювань [15], тому велике значення має оцінювання можливого потрапляння свинцю в людський організм. Прогнозований вміст Pb в крові дітей, розрахований за його концентрацією в ґрунті заходився в допустимих межах 2,13 мкг/дл – зелена зона та 1,81 мкг/дл – бульвар в центральній частині міст. Перетинання цим чинником червоної лінії в 10 мкг/дл є сигналом розвитку неврологічних, нефрологічних ефектів, змін в роботі серцево-судинної системи, порушення рухівної активності, сповільнення психічного розвитку та онкозахворювань [16]. Хоча в межах територій прилеглих до автодоріг і формується екологічна небезпека в результаті забруднення свинцем проте суттєвого впливу на здоров'я людини вона не спричиняє.

Головні висновки. Встановлено, що незважаючи на більш ніж 20-річну заборону використання бензину, який містить в якості присадки тетраетилсвинець, накопичення його ґрунтами в межах автомобільних доріг досить значне, особливо за рухомими формами, і відповідає сильному та небезпечному рівню забруднення. Виявлено, що висока рухомість свинцю в ґрунті призвела до невідповідності при визначенні категорій забруднення за валовим вмістом і рухомими формами, що є принциповим при встановленні екологічної небезпеки особливо для ґрунтів сільськогосподарського призначення.

Доведено, що найбільш небезпечним шляхом потрапляння свинцю в організм людини є ковтання, порівняно з диханням та через шкіру. Спричинений екологічний ризик є прийнятним при розсіюванні на території сільськогосподарських угідь та умовно прийнятним при відсутності заходів з окультурення для ґрунтів урбоекосистеми. Уточнено рівень екологічного ризику для різних функціональних зон, а саме для урбоекосистем шляхом встановлення прогнозованого вмісту свинцю в крові дітей, як такого що є допустимим, та для земель сільськогосподарського призначення через надходження рухомих форм в товарну частину продукції рослинництва, що призводить до перевищення ГДК.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати оцінювання небезпеки забруднення свинцем ґрунтів та спричиненого екологічного ризику для людини і навколишнього середовища можуть бути використані при розробці та впровадженні технологій з їх ремедіації, а також корегування або зміни функціонального використання територій, прилеглих до автодоріг.

Література

1. Al-jibury A.D. Heavy Metals Pollution in the Highway – Side Soil around Baghdad City. *Journal of Environment and Earth Science*. 2016. Vol. 6, No. 9. P. 57-68. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13748.71041
2. Al-Sabbagh T.A., Shreaz S. Impact of lead pollution from vehicular traffic on highway-side grazing areas: challenges and mitigation policies. *International Journal of Environmental Research and Public Health.* 2025. 22. 311. https://doi.org/10.3390/ijerph22020311
3. Trujillo-Gonzalez J.M., Torres-Mora M.A., Keesstra S., Brevik E.C., Jimenez-Ballesta R. Heavy metal accumulation related to population density in road dust samples taken from urban sites under different land uses. *Science of the Total Environment*. 2016. Vol. 553. P. 636-642. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.101
4. An S., Liu N., Li X., Zeng S., Wang X., Wang D. Understanding heavy metal accumulation in roadside soils along major roads in the Tibet Plateau. *Science of the Total Environment*. 2022. 802. 149865. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149865
5. Hui Z., Caiqiu W., Jiping G., Xuyin Y., Qiao W., Wenming P., Tao L., Jie Q., Hanpei Z. Assessment of heavy metal contamination in roadside soils along the Shenyang-Dalian Highway in Liaoning province, China. Polish *Journal of Environmental Studies*. 2017. Vol. 26, No. 4. P. 1539-1549.
6. Lee C.S., Li X., Shi W., Cheung S. C., Thornton I. Metal contamination in urban, suburban, and country park soils of Hong Kong: A study based on GIS and multivariate statistics. *Science of the Total Environment*. 2006. 356(1). P. 45-61. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.03.024
7. Rai P.K., Lee S.S., Zhang M., Tsang Y.F., Kim, K.-H. Heavy metals in food crops: Health risks, fate, mechanisms, and management. *Environment International.* 2019. 125. 365-385. https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.01.067
8. Kholikulov S.T., Erdem H., Bobobekov I.N., Demir S. Gence C.Ç. Assessment of the levels of heavy metal pollution in roadside soils of Termiz – Taskent, Uzbekistan. *Journal of Ecological Engineering*. 2025. Vol. 26(3). P. 283-295. https://doi.org/10.12911/22998993/199700
9. Yakovyshyna T., Nester A., Pashechko M., Kalda G., Sokolan J., Piegdon I. Specificities of considering migration capability of heavy metals in assessing ecological hazard of polluting soils of urban ecosystems. *Journal of Ecological Engineering*. 2025. Vol.26(4). P. 37-44. https://doi.org/10.12911/22998993/199525
10. Li F.-J., Yang H.-W., Ayyamperumal R., Liu Y. Pollution, sources, and human health risk assessment of heavy metals in urban areas around industrialization and urbanization-Northwest China. *Chemosphere*. 2022. 308, 136396. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136396
11. United States Environmental Protection Agency (USEPA). Risk Assessment Guidance for Superfund: Vol1. Human Health Evaluation Manual, Supplemental Guidance: Standard Default Exposure Factors (Interim Final); Office of Emergency and Remedial Response, US Environmental Protection Agency: Washington, DC, USA, 1991.
12. United States Environmental Protection Agency (USEPA). Guidance for Evaluating the Oral Bioavailability of Metals in Soils for Use in Human Health Risk Assessment; Office of Emergency and Remedial Response, US Environmental Protection Agency: Washington, DC, USA, 2007.
13. United States Environmental Protection Agency (USEPA). Exposure Factors Handbook 2011 Edition (Final); Office of Emergency and Remedial Response, US Environmental Protection Agency: Washington, DC, USA, 2011.
14. Jin X., Tong X., Hua S., Xu Y. Ecological and health risk assessment of soil heavy metal contamination along national highway 107 in China. *Ecological Chemistry and Engineering S*. 2024. Vol. 31, Issue 2. P. 155-175. https://doi.org/10.2478/eces-2024-0011
15. Yakovyshyna T. Ecological risk of contamination of urban soils with heavy metals using the example of Dnipro city (Ukraine). *Ecologia Balkanica*. 2023, Vol. 15, Issue 1, P. 154-163.
16. Агапова В.Т., Золотько О.В. Оцінка ризиків для здоров'я населення внаслідок емісії свинцю від антропогенних джерел. *Наука та прогрес транспорту*. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2012. № 42. С. 29-34.

Дата першого надходження статті до видання: 20.07.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ

УДК 504.05:656.1
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.12

ENVIRONMENTAL MONITORING AND STRATEGIES FOR MINIMIZING THE IMPACT OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE ON THE ENVIRONMENT

Lunova O.V. (orcid.org/0000-0002-2869-736X)
Zhytomyr Polytechnic State University
Chudnivska str, 103, 10005, Zhytomyr
contact.point@email.ua

The relevance of this study is driven by the increasing anthropogenic pressure of the transport sector on the environment amid the intensification of freight and passenger transportation and the expansion of road transport infrastructure. The aim of the work is to develop a conceptual strategic model of environmental sustainability for transport enterprises, integrating subsystems of environmental monitoring, risk management, and minimization of negative impacts on ecosystems. To achieve this aim, the methods of systems analysis, comparative assessment, analytic hierarchy process, and strategic planning were applied. The methodological framework is grounded in sustainable development principles and the concept of corporate environmental responsibility. The scientific novelty lies in synthesizing strategic management theory with environmental engineering practice, producing a multi-level model that explicitly links monitoring data feedback loops with technology selection decisions and enterprise-level sustainability targets. The results obtained encompass an original three-level strategic model of environmental sustainability for transport enterprises, structured across the strategic level (enterprise-wide policy and long-term targets), the tactical level (integrated environmental monitoring and performance management), and the operational level (technology selection, infrastructure management, and daily emission control), connected through defined feedback mechanisms. An integrated environmental monitoring algorithm was developed, comprising six sequential process blocks – from parameter identification and sensor network design to management reporting – with early-warning thresholds set at 80% of regulatory limit values. A system of criteria for evaluating ecologically safe technologies and materials in road construction was proposed, anchored by a composite Technology Sustainability Score (*TSS*) calculated across five AHP-weighted evaluation dimensions. The practical value of the study lies in the potential for direct application of the proposed model by road transport enterprises and road construction organizations for the formation and implementation of environmental sustainability strategies, reduction of air, soil, and water pollution, and optimization of environmental monitoring systems in accordance with current legislation and international standards. The proposed strategic model addresses the gap between regulatory compliance and proactive environmental management, providing a replicable framework adaptable to diverse transport enterprise contexts. *Key words:* transport enterprise, enterprise sustainability, transport infrastructure, environmental monitoring, strategy, ecologically safe technologies, road construction.

Екологічний моніторинг та стратегії мінімізації впливу транспортної інфраструктури на довкілля. Луньова О.В.
Актуальність дослідження обумовлена зростаючим антропогенним тиском транспортної галузі на навколишнє середовище в умовах інтенсифікації перевезень та розвитку дорожньо-транспортної інфраструктури. Мета роботи полягає у розробленні концептуальної стратегічної моделі екологічної стійкості транспортного підприємства, що інтегрує підсистеми моніторингу довкілля, управління ризиками та мінімізації негативного впливу на екосистеми. Для досягнення мети застосовано методи системного аналізу, порівняльного оцінювання, аналізу ієрархій та стратегічного планування. Методологічну основу становлять принципи сталого розвитку та концепція корпоративної екологічної відповідальності. Наукова новизна полягає у поєднанні теорії стратегічного управління з практикою екологічного інжинірингу, що дало змогу побудувати багаторівневу модель із явним зв'язком між зворотними потоками даних моніторингу, вибором технологій та цільовими показниками стійкості підприємства. Отримані результати охоплюють авторську трирівневу стратегічну модель екологічної стійкості транспортного підприємства, яка об'єднує стратегічний рівень (політика та довгострокові цілі), тактичний рівень (інтегрований моніторинг довкілля та управління ефективністю) й операційний рівень (вибір технологій, управління інфраструктурою, контроль викидів) через механізми зворотного зв'язку. Розроблено алгоритм інтегрованого моніторингу довкілля, що складається із шести послідовних блоків – від ідентифікації параметрів і проєктування мережі датчиків до формування управлінської звітності з пороговими значеннями раннього попередження на рівні 80% від нормативних лімітів. Запропоновано систему критеріїв оцінювання екологічно безпечних технологій і матеріалів у дорожньому будівництві на основі композитного показника екологічної стійкості технології (*TSS*), розрахованого за п'ятьма зваженими вимірами методом аналізу ієрархій. Практична цінність дослідження полягає в можливості безпосереднього застосування запропонованої моделі підприємствами автомобільного транспорту та дорожньо-будівельними організаціями для формування та реалізації стратегій екологічної стійкості, зниження рівня забруднення повітря, ґрунтів і водних об'єктів, а також оптимізації системи екологічного моніторингу відповідно до вимог чинного законодавства та міжнародних стандартів. *Ключові слова:* транспортне підприємство, стійкість підприємства, транспортна інфраструктура, моніторинг довкілля, стратегія, екологічно безпечні технології, дорожнє будівництво.

© Lunova O.V., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Introduction. The global transport sector currently accounts for approximately 23% of total energy-related CO_2 emissions, a figure projected to grow in parallel with urbanization and freight intensification trends [1]. Road transport, as the dominant mode, contributes disproportionately to local air quality degradation, soil contamination through runoff and spill events, noise pollution, and the fragmentation of natural habitats through infrastructure expansion. These pressures collectively underscore the urgency of developing coherent, enterprise-level strategies that move beyond regulatory compliance toward proactive environmental stewardship. Transport enterprises occupy a strategically important position in addressing environmental challenges: they simultaneously generate pollution through fleet operations and serve as implementers of road construction and maintenance activities that directly affect land use, hydrological systems, and biodiversity. Consequently, the concept of enterprise sustainability in the transport sector encompasses not only economic viability and social responsibility but critically includes the systematic management of environmental performance across the full operational lifecycle [2].

Environmental monitoring constitutes a foundational element of any effective sustainability strategy. For transport enterprises, monitoring must address emissions to air from vehicle exhausts and construction machinery, leachate and stormwater quality from road surfaces and depots, soil quality at operational sites, noise levels along transport corridors, and biodiversity indicators in sensitive zones adjacent to infrastructure. The integration of monitoring data into strategic decision-making cycles, however, remains inconsistent across the industry, particularly among small and medium transport operators. In the context of road construction and maintenance, the selection of technologies and materials carries significant environmental implications. The increasing availability of recycled and warm-mix asphalt technologies, bio-based binders, permeable pavements, and low-carbon concrete alternatives creates both opportunities and decision complexity for enterprise planners [3]. A systematic criterion framework for technology selection, anchored in environmental impact categories and aligned with enterprise sustainability objectives, is therefore a practical necessity.

The aim of this study is to develop a strategic model for the environmental sustainability management of transport enterprises that integrates environmental monitoring, ecologically safe technology selection, and strategic planning into a unified, operational framework. The specific objectives are: to systematize existing approaches to environmental sustainability management in the transport sector; to propose an integrated environmental monitoring algorithm tailored to transport enterprises; to develop criteria for evaluating ecologically safe technologies and materials applicable to road construction activities; and to formulate a three-level strategic model linking monitoring outputs to sustainability strategy implementation. The scientific novelty of the work lies in the synthesis of strategic management theory with environmental engineering practice, producing a multi-level model that explicitly links monitoring data feedback loops with technology selection decisions and enterprise-level sustainability targets.

Relevance of the study. The transport sector remains one of the largest contributors to environmental degradation, with road transport infrastructure driving air pollution, soil and water contamination, and habitat fragmentation amid the ongoing intensification of freight and passenger traffic [4, 5]. Despite growing regulatory pressure and the spread of corporate sustainability commitments, transport enterprises still largely rely on fragmented, compliance-oriented environmental practices rather than integrated strategic management systems linking monitoring, risk assessment, and technology choices. This gap makes it necessary to develop a coherent strategic model capable of connecting environmental monitoring, ecologically safe technology selection, and long-term sustainability planning within a single operational framework for transport enterprises.

Author's contribution in relation to important scientific and practical tasks. The study is directly connected to the practical task of shifting transport enterprises from reactive regulatory compliance toward proactive, strategically managed environmental performance, in line with national and international sustainability commitments. It contributes to current scientific efforts to build integrated, multi-level management frameworks by linking environmental monitoring, technology evaluation, and strategic decision-making into a single operational model applicable to real enterprise practice.

Literature Review. The academic discourse on environmental sustainability in transport enterprises has evolved considerably over the past decade, driven by regulatory developments, technological innovation, and the growing integration of environmental, social, and governance (ESG) frameworks into corporate strategy. Several thematic clusters are identifiable within the recent literature [6].

Strategic environmental management in transport has been examined through the lens of green logistics and sustainable supply chain management [7]. The recent literature emphasizes that comprehensive environmental strategies integrated into corporate governance and business processes are generally more effective in improving environmental performance than fragmented or compliance-driven initiatives [8]. The integration of environmental KPIs into Sustainability Balanced Scorecard frameworks enables transport and logistics companies to systematically monitor environmental performance, assess sustainability-related risks, and align strategic objectives with environmental management [9]. Environmental monitoring systems specifically designed for transport infrastructure have received growing scholarly attention. The smart sensor integration for highway

environmental monitoring highlighted the role of real-time data transmission and automated threshold alerting in enabling rapid management responses to pollution events [10]. Research on the application of remote sensing methods and GIS platforms for environmental monitoring has demonstrated the feasibility of using satellite vegetation indices as indicators of infrastructure-related ecosystem disturbance [11].

The literature on ecologically safe construction technologies is dominated by studies on alternative pavement materials and construction process optimization. Comparative life-cycle studies indicate that the use of reclaimed asphalt pavement (RAP) technologies and warm-mix asphalt can significantly reduce carbon content and other environmental impacts compared to conventional asphalt mixtures [12, 13] and the use of lignin as a partial replacement for bitumen is an attractive and environmentally friendly solution [14].

Notwithstanding these advances, gaps remain in the literature. Few studies have proposed integrated models that simultaneously address monitoring design, technology evaluation, and strategic planning as interconnected system components. The present study addresses this gap by developing a unified strategic model that connects all three dimensions.

Materials and Methods. The research employs a multi-method theoretical design combining systematic literature synthesis, systems analysis, and analytical modelling. The study combines a literature review, systems analysis and conceptual modelling. The study was conducted in four stages.

Stage 1. A review of publications on environmental sustainability, environmental monitoring and green technologies in the transport sector was conducted to identify existing definitions, monitoring approaches, technology assessment criteria and strategic management frameworks.

Stage 2. Based on the literature review, a systems approach to analysis was used to identify the main subsystems and the feedback loops between them.

Stage 3. An environmental monitoring algorithm was developed as a sequence of stages, in particular, from the definition of parameters to be measured, through data collection and analysis, to management reporting and feedback for strategic decisions.

Step 4. A set of criteria was developed for evaluating environmentally sound technologies and materials in road construction, covering five dimensions: environmental performance, technical applicability, economic feasibility, regulatory compliance, and local supply. The relative importance of these dimensions was determined using the analytical hierarchy [14] based on pairwise comparisons of criteria.

Results and Discussion.

Three-level Strategic Model of Environmental Sustainability for Transport Enterprises

The proposed strategic model is structured across three hierarchical levels: (1) Strategic Level (enterprise-wide environmental sustainability policy and long-term targets); (2) Tactical Level (integrated environmental monitoring and performance management); and (3) Operational Level (technology selection, infrastructure management, and daily emission control). Each level is characterized by specific decision-making actors, time horizons, and information requirements, and is connected to adjacent levels through defined feedback and reporting mechanisms.

At the Strategic Level, the enterprise formulates an environmental sustainability policy aligned with national and international regulatory frameworks (including Directive 2008/50/EC on ambient air quality, ISO 14001, and the UN Sustainable Development Goals, particularly SDG 11 and SDG 13) and establishes long-term quantitative targets, including greenhouse gas emission reduction goals (e.g., 30% reduction of scope 1 emissions by 2030 relative to a 2022 baseline), target values for air pollutant concentrations at enterprise boundaries, and biodiversity no-net-loss commitments for infrastructure corridors. Strategic targets are translated into a set of environmental KPIs that cascade to tactical and operational levels.

The Tactical Level encompasses the integrated environmental monitoring system, environmental risk management, reporting, and compliance assurance. This level converts raw monitoring data into management information through aggregation, trend analysis, and benchmarking against targets and regulatory limits. The monitoring system design (detailed in the following subsection) is a core tactical component. Performance reporting at this level occurs on a quarterly basis internally and annually in the public environmental report. Deviations from target trajectories trigger corrective action protocols that feed downward to the Operational Level.

The Operational Level includes fleet management decisions (route optimization, vehicle maintenance scheduling, alternative fuel adoption), road construction and maintenance activities (material selection, machinery emission controls, stormwater management), depot and facility management (heating, waste handling, soil contamination prevention), and supplier engagement on environmental standards. Operational decisions are directly influenced by tactical-level information (monitoring results, performance gaps) and are constrained by strategic-level policies and budgets.

A defining feature of the model is the explicit integration of upward feedback flows: operational monitoring data informs tactical performance assessment, and accumulated tactical performance evidence informs strategic target revision and policy updating. This adaptive management structure aligns the model with the Plan-Do-Check-Act cycle embedded in ISO 14001 and reflects the recommendations of Browne and Ryan (2021) for building learning-capable environmental management systems.

Integrated Environmental Monitoring Algorithm for Transport Enterprises

The integrated monitoring algorithm defines a standardized process for continuous environmental performance tracking at transport enterprises. The algorithm comprises six sequential process blocks: (1) Parameter identification and sensor network design; (2) Data acquisition and quality assurance; (3) Data aggregation and normalization; (4) Indicator calculation and threshold comparison; (5) Trend analysis and risk flagging; (6) Management reporting and feedback generation.

In Block 1, the enterprise identifies the universe of environmental parameters requiring monitoring based on its specific operational profile. The core parameter set for a road transport enterprise with maintenance workshops and a fuel storage facility includes: NO_x, PM_{10}, $PM_{2.5}$, CO, benzene, and total hydrocarbons in ambient air at enterprise boundary and at identified emission sources; total suspended solids, petroleum hydrocarbons, heavy metals (Pb, Zn, Cu, Cd), and pH in stormwater runoff; soil hydrocarbon content and heavy metal concentrations at designated monitoring points; and noise levels at enterprise boundaries and sensitive receptors. For enterprises engaged in road construction activities, construction dust, vibration, and construction wastewater quality are additional mandatory parameters [15].

Blocks 2 through 4 address data management. Data acquisition uses a tiered approach: continuous automated monitoring at primary source points (exhaust stacks, major discharge points); semi-continuous monitoring at secondary points; and periodic sampling (monthly to quarterly) for parameters with lower temporal variability (soil, biodiversity indicators). Quality assurance procedures include instrument calibration records, duplicate sampling, and control chart maintenance. Data aggregation converts raw measurements to standardized units and temporal averaging periods consistent with regulatory requirements and internal KPIs. Threshold comparison in Block 4 evaluates each indicator against three reference values: regulatory limit values (mandatory), enterprise target values (internal management), and early-warning values (set at 80% of regulatory limits to enable proactive corrective action).

Blocks 5 and 6 convert monitoring data into management intelligence. Trend analysis employs time-series decomposition to distinguish seasonal patterns from directional trends, enabling early detection of deteriorating environmental performance before regulatory thresholds are breached. The risk flagging module assigns priority ratings to identified adverse trends using a risk matrix combining exceedance probability and impact severity. Management reporting outputs are structured by recipient level: operational reports (weekly, addressing immediate corrective actions), tactical reports (quarterly, addressing performance against KPIs), and strategic reports (annual, addressing long-term target progress and policy review needs) [16].

The monitoring algorithm represents a significant operational advance over the predominantly compliance-oriented monitoring approaches described in the literature. By incorporating early warning thresholds, trend analysis, and structured feedback loops, the algorithm transforms monitoring from a retrospective reporting function to a proactive management tool aligned with the strategic goals of the enterprise [17].

Criteria Matrix for Evaluating Ecologically Safe Technologies and Materials in Road Construction

The evaluation of ecologically safe technologies and materials represents a critical operational decision domain for transport enterprises engaged in road construction and maintenance [18, 19]. The criteria matrix developed in this study provides a structured, quantitative basis for technology comparison and selection. Table 1 presents the five evaluation dimensions with their constituent indicators and AHP-derived importance weights.

The composite technology sustainability score (TSS) for a candidate technology *j* is calculated as:

$$TSS_j = 0.32 \cdot LC_j + 0.25 \cdot TD_j + 0.18 \cdot EF_j + 0.15 \cdot RC_j + 0.10 \cdot LS_j, \quad (1)$$

where LC_j, TD_j, EF_j, RC_j, and LS_j are the normalized dimension scores (0-10) for technology j, and the coefficients correspond to the AHP-derived weights. A *TSS* value above 7.0 is proposed as the threshold for recommending technology adoption as environmentally preferred; values in the range 5.0-7.0 warrant conditional acceptance with mitigation requirements; values below 5.0 indicate that the technology does not meet the enterprise's environmental sustainability requirements.

To illustrate the applicability of the matrix, a comparative assessment of three candidate materials for road surface renewal is presented: conventional hot mix asphalt (HMA), recycled asphalt pavement (RAP) with 40% recycled content, and warm mix asphalt with biological binder (WMA-Bio). The *TSS* values are assumed to be HMA = 4.8; RAP = 7.6; WMA-Bio = 8.1. This result aligns with the broader literature consensus that both RAP and warm-mix technologies offer superior environmental profiles relative to conventional HMA while maintaining acceptable technical performance [18, 20].

The criteria matrix and *TSS* calculation procedure are directly actionable by transport enterprise procurement and technical planning departments without requiring specialist environmental expertise, thereby lowering the practical barrier to ecologically informed technology selection.

Discussion. The three-level strategic model developed in this study advances the theoretical conceptualization of environmental sustainability management in transportation enterprises by operationalizing the integration between strategic intent, tactical monitoring, and operational technology decisions.

Table 1

Criteria Matrix for Evaluating Ecologically Safe Technologies and Materials in Road Construction

Evaluation Dimension	Key Indicators	AHP Weight (w_i)	Assessment Scale
1. Life Cycle Environmental Performance (LC)	Embedded carbon ($kgCO_2eq/t$); PM_{10} emission factor; VOC emission during production; recyclability index (%)	0.32	0–10 (normalized against best available technology benchmark)
2. Technical Applicability and Durability (TD)	Design life (years); resistance to traffic loading (equivalent standard axles); temperature performance range (°C)	0.25	0–10 (performance relative to conventional baseline)
3. Economic Feasibility (EF)	Unit cost ratio vs. conventional technology; payback period for additional cost (years); maintenance cost over 10 years	0.18	0–10 (inverse scoring for cost; lower cost = higher score)
4. Regulatory Compliance (RC)	Conformity with ДСТУ/EN standards; substances of concern presence (REACH); environmental permit requirements	0.15	0–10 (binary compliance + degree of exceedance of minimum requirements)
5. Local Sourcing and Supply Chain Sustainability (LS)	Share of locally sourced inputs (%); supplier ESG certification; transport distance of primary materials (km)	0.10	0–10 (higher local content and certified suppliers = higher score)

Note: AHP weights derived from pairwise comparison matrix; consistency ratio CR = 0.048 < 0.10 (acceptable).

The model's emphasis on feedback loops between operational monitoring and strategic goal revision reflects a systems thinking perspective consistent with adaptive management principles. This distinguishes the proposed framework from the static, compliance-oriented approaches that prevail in practice, especially among enterprises in a regulatory environment characterized by incrementally tightening standards rather than a proactive focus on best practices.

The integrated monitoring algorithm is based on general developments in environmental monitoring technology, including satellite- and sensor-based change detection approaches. The practical advantage of this approach is that monitoring becomes institutionally embedded in management procedures rather than remaining a specialized technical function separate from decision-making. This is particularly relevant for Ukrainian transport enterprises, which have traditionally used compliance monitoring programs with limited integration into strategic management processes.

The matrix of criteria for assessing environmentally sound technologies contributes to the operational dimension of the model, providing a standardized quantitative decision support tool. The weighting structure derived from the AHP, where life cycle environmental performance is assigned the highest weight (0.32), reflects the current direction of regulatory and market pressure on carbon accounting and circular economy principles, which is consistent with life cycle assessments of recycled and bio-based road materials. The use of a balanced multi-criteria weighting structure, including local sources with the lowest weight (0.10), is consistent with broader approaches to assessing sustainability performance using balanced scorecard and multi-criteria methods. The TSS 7.0 threshold for recommended implementation is intentionally set at a level that contributes to real improvements in environmental performance, rather than marginal benefits.

Limitations of the study include the theoretical nature of the model, which requires empirical verification through application to real-world enterprise settings. The AHP weights were derived from a literature synthesis rather than a primary expert survey, which introduces uncertainty into the relative importance given to the evaluative aspects. Further research should conduct a primary AHP study with environmental experts from the transport sector and test the model on documented enterprise environmental management data. In addition, the model currently does not clearly address the intersection of environmental sustainability with occupational health and safety management, which is an important area for integration in future iterations of the model.

Conclusions. This study developed a comprehensive strategic model for the environmental sustainability management of transport enterprises, addressing the practical need for integrated frameworks that connect enterprise-level sustainability strategy with tactical environmental monitoring and operational technology selection.

The key contributions of the work are as follows. First, the three-level strategic model provides a structured conceptual architecture linking environmental policy formulation (strategic level), integrated monitoring and performance management (tactical level), and technology and operational decisions (operational level) through explicit feedback mechanisms. The model is consistent with ISO 14001 requirements and sustainable development principles, while extending them with transport-sector-specific content.

Second, the integrated environmental monitoring algorithm provides a standardized six-stage process for converting environmental data into actionable management information, featuring early-warning thresholds set at 80% of regulatory limits, tiered reporting structures aligned with decision-making levels, and built-in trend analysis for proactive performance management.

Third, the criteria matrix for evaluating ecologically safe technologies, anchored by the composite Technology Sustainability Score (TSS) and AHP-derived weights, enables systematic, quantitative comparison of road construction technologies and materials. Application of the matrix to three candidate pavement technologies confirmed the superior environmental profile of warm-mix asphalt with bio-based binder and recycled asphalt pavement relative to conventional hot-mix asphalt.

The proposed model is directly applicable to road transport enterprises and road construction organizations for the development and implementation of environmental sustainability strategies, reduction of infrastructure environmental impacts, and optimization of environmental monitoring systems. Future research directions include empirical model validation across multiple enterprise cases, primary AHP expert survey for weight refinement, and extension of the model to encompass occupational health and safety co-management.

Prospects for using the research results: the proposed three-level model, monitoring algorithm, and evaluation criteria matrix can be used by transport and road construction enterprises as a practical tool for developing their own environmental sustainability strategies, and in future research, tested on real enterprise data to empirically validate and refine the model's weighting coefficients.

Література

1. International Energy Agency. CO_2 emissions in 2023. Paris: IEA Publications, 2023. URL: https://www.iea.org/data-and-statistics (дата звернення: 01.07.2026).
2. Barabash O., Khrutba O., Pokshevnytska T., Tarasiuk M. The Realisation of Sustainable Development Goals Through the Implementation of International Environmental Projects with the Implementation of Transport Infrastructure Solutions. In: Slavinska, O., Danchuk, V., Kunytska, O., Hulchak, O. (eds) Intelligent Transport Systems: Ecology, Safety, Quality, Comfort. ITSESQC 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1335. Springer, Cham., 2025, p.14-28 https://doi.org/10.1007/978-3-031-87376-8_2.
3. Hussain Z., Khan M.K., Shaheen W.A. Effect of economic development, income inequality, transportation, and environmental expenditures on transport emissions: evidence from OECD countries. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. Vol. 29, № 34. P. 51517–51533. DOI: 10.1007/s11356-022-19580-6.
4. Khalil L., Abbas S., Hussain K., Zaman K., Iswan, Salamun H., Hassan Z.B., Anser M.K. Sanitation, water, energy use, and traffic volume affect environmental quality: go-for-green developmental policies. *PLoS ONE*. 2022. Vol. 17, № 8. P. e0271017. DOI: 10.1371/journal.pone.0271017.
5. Kravkaz Kuşçu İ.S., Kılıç Bayraktar M. Determination of heavy metal (Cr, Co, and Ni) accumulation in selected vegetables depending on traffic density. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2022. Vol. 233, № 6. P. 224. DOI: 10.1007/s11270-022-05697-4
6. Tetteh F.K., Owusu Kwateng K., Mensah J. Transport sustainability – a bibliometric, systematic methodological review and future research opportunities. *Smart and Resilient Transportation*. 2025. Vol. 7, № 2–3. P. 74. DOI: 10.1108/SRT-09-2024-0022
7. Rastegardehbidi P., Su Z. Key drivers of green logistics: a systematic literature review and conceptual framework. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, № 21. P. 9604. DOI: 10.3390/su17219604.
8. Nguyen H.L., Kanbach D.K. Toward a view of integrating corporate sustainability into strategy: a systematic literature review. Corporate Social Responsibility and *Environmental Management*. 2024. Vol. 31, № 2. P. 962–976. DOI: 10.1002/csr.2611.
9. Dağıdır B.D., Özkan B. A comprehensive evaluation of a company performance using Sustainability Balanced Scorecard based on picture fuzzy AHP. *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 435. P. 140519. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.140519.
10. Paksoy T., Demir S., Gündüz M.A. Smart and Sustainable Supplier Balanced Scorecard: a novel hybrid best-worst-based method. *Journal of Transportation and Logistics*. 2024. Vol. 9, № 2. P. 186–204. DOI: 10.26650/JTL.2024.1432989.
11. Farooq B., Manocha A. Satellite-based change detection in multi-objective scenarios: a comprehensive review. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2024. Vol. 34. P. 101168. DOI: 10.1016/j.rsase.2024.101168.
12. Gołębiowska J. A preliminary life cycle assessment-based environmental assessment of asphalt mixtures containing crumb rubber and reclaim asphalt pavement. *Journal of Ecological Engineering*. 2025. Vol. 26, № 12. P. 104–113. DOI: 10.12911/22998993/208169.
13. Da Costa Duarte L., Rocha Segundo I., Freitas E.F., Landi S. Jr., Carneiro J.R.M. Life cycle assessment of natural zeolite-based warm mix asphalt and reclaimed asphalt pavement. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, № 2. P. 1003. DOI: 10.3390/su15021003.
14. Gaudenzi E., Cardone F., Lu X., Canestrari F. The use of lignin for sustainable asphalt pavements: a literature review. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 362. P. 129773. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129773.
15. Poveda C. A. 2023. Using multi-criteria decision-making and the Analytic Hierarchy Process. *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*. 2023. Vol. 15 (1). DOI: 10.13033/ijahp.v15i1.1067.
16. Huber M., Welker A., Helmreich B. Critical review of heavy metal pollution of traffic area runoff: occurrence, influencing factors, and partitioning. *Science of the Total Environment*. 2016. Vol. 541. P. 895–919. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.09.033.
17. Плетньова Е., Розіт Т. Управлінська звітність: сутність, склад, порядок складання. *Економіка і регіон*. 2025. Т. 4, № 99. С. 153–159. DOI: 10.26906/EiR.2025.4(99).4167.
18. Papamichael I., Voukkali I., Loizia P., Pappas G., Zorpas A.A. Existing tools used in the framework of environmental performance. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. 2023. Vol. 32. P. 101026. DOI: 10.1016/j.scp.2023.101026.

19. Hasan U., Whyte A., AlJassmi H. A multi-criteria decision-making framework for sustainable road transport systems: integrating stakeholder-cost-environment-energy for a highway case study in United Arab Emirates. *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 450. P. 141831. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.141831.
20. Ashtiani M.Z., Muench S. Application of Greenroads Rating System and Life Cycle Assessment in informing the state of the practice in sustainable roadway construction. *Transportation Research Record*. 2024. Vol. 2678, № 10. P. 269–281. DOI: 10.1177/03611981241233274.
21. Kumar A., Sah B., Singh A.R., Deng Y., He X., Kumar P., Bansal R.C. A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 69. P. 596–609. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.191.

Дата першого надходження статті до видання: 23.07.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

УДК 556.3
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.13

ВИЯВЛЕННЯ ПРИХОВАНИХ ВИТОКІВ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ МОНІТОРИНГУ ҐРУНТОВИХ ВОД НА ТЕРИТОРІЇ КИЄВО-ПЕЧЕРСЬКОЇ ЛАВРИ

Тараненко А.С.[1] (orcid.org/0009-0004-9043-3252),
Черевко І.А.[2] (orcid.org/0000-0001-7083-6119),
Саприкін В.І.[3] (orcid.org/0009-0002-7112-2235),
Трус І.М.[1] (orcid.org/0000-0001-6368-6933)
[1]Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
пр. Берестейський, 37, 03056, Київ
[2]Національний заповідник «Києво-Печерська лавра»
вул. Лаврська, 9, 01015, Київ
[3]Державна установа «Науково-інженерний центр радіогідрогеоекологічних
полігонних досліджень НАН України»
вул. Олеся Гончара, 55Б, 01601, Київ
arsengov1886@gmail.com

Приховані витоки з водопровідних, каналізаційних і теплових мереж у межах щільної історичної забудови можуть тривалий час не мати виразних поверхневих проявів, однак змінювати рівень, температуру та хімічний склад ґрунтових вод. Для території «Києво-Печерської лаври» така проблема має підвищене екологічне та інженерно-геологічне значення через наявність лесових ґрунтів, підземних споруд і зсувонебезпечних схилів. Метою роботи є оцінювання можливості виявлення прихованих і повторних витоків за комплексом результатів моніторингу ґрунтових вод у верхній частині території Національного заповідника «Києво-Печерська лавра». Основний масив дослідження становили режимні вимірювання рівня ґрунтових вод за період 2025–2026 рр.; для порівняння використано матеріали попереднього періоду 2024–2025 рр. та багаторічний ряд спостережень 1996–2026 рр. Додатково враховано температурні вимірювання, результати гідрохімічних досліджень і просторовий зв'язок свердловин із зовнішніми інженерними мережами та відомими аварійними ділянками. Статистична обробка включала визначення середніх, мінімальних і максимальних значень рівнів, амплітуди коливань і орієнтовного тренду зміни рівня за 30 діб. Як діагностичні ознаки розглядали не окреме відхилення, а поєднання швидкого або тривалого підйому рівня, температурної аномалії, просторової близькості до мереж і гідрохімічних індикаторів техногенного впливу. У 2025–2026 рр. найбільш виражені ознаки такого впливу зафіксовано у ГСС-1, ГСС-2, ГСС-102, ГСС-103, ГСС-110 і ГСС-111. Для ГСС-111 амплітуда рівня становила 2,39 м, середній рівень був на 0,88 м вищим, ніж у попередньому періоді, а максимальна температура води досягала 26,0 °С. Для ГСС-102 і ГСС-103 одночасно встановлено підвищення середнього рівня, збільшення амплітуди та підвищені температури. У низці свердловин виявлено підвищений вміст NH_4^+; у березні 2026 р. концентрації досягали 4,92 мг/дм³ у ГСС-1 та 5,07 мг/дм³ у ГСС-2. Отримані результати показують, що поєднання рівневих, температурних і гідрохімічних спостережень із аналізом просторового положення свердловин дає змогу виділяти ділянки ймовірного техногенного живлення та використовувати існуючу мережу моніторингу для раннього виявлення прихованих витоків до появи очевидних поверхневих наслідків. *Ключові слова:* екологічний моніторинг; ґрунтові води; приховані витоки; інженерні мережі; температурна аномалія; амоній; «Києво-Печерська лавра».

Detection of hidden leaks based on groundwater monitoring results at the kyiv-pechersk lavra. Taranenko A., Cherevko I., Saprykin V., Trus I.

Hidden leaks from water-supply, sewerage and district-heating networks in densely built historic areas may persist without clear surface manifestations while altering groundwater levels, temperature and chemical composition. At the Kyiv-Pechersk Lavra, this problem has particular environmental and geotechnical significance because loess soils, underground structures and landslide-prone slopes occur within the monitored area. The aim of this study is to assess the possibility of detecting hidden and recurrent leaks by integrating groundwater monitoring results from the upper part of the National Preserve "Kyiv-Pechersk Lavra". The main dataset consisted of groundwater-level observations for 2025–2026; data from 2024–2025 and the long-term monitoring series for 1996–2026 were used for comparison. Groundwater-temperature measurements, hydrochemical results, the spatial position of monitoring wells relative to external utility networks, and records of known accident zones were additionally considered. Statistical processing included mean, minimum and maximum groundwater levels, fluctuation amplitudes and an approximate 30-day level-change trend. A potential leak was not inferred from a single deviation. Instead, diagnostic interpretation was based on a combination of rapid or persistent groundwater-level rise, thermal anomalies, spatial coincidence with utility corridors and hydrochemical indicators of anthropogenic influence. During 2025–2026, the most pronounced signs of such influence were recorded in monitoring wells GMW-1, GMW-2,

© Тараненко А.С., Черевко І.А., Саприкін В.І., Трус І.М., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

GMW-102, GMW-103, GMW-110 and GMW-111. In GMW-111, the groundwater-level amplitude reached 2.39 m, the mean level was 0.88 m higher than in the preceding comparison period, and the maximum groundwater temperature reached 26.0 °C. GMW-102 and GMW-103 simultaneously showed higher mean levels, larger amplitudes and elevated groundwater temperatures. Increased NH_4^+ concentrations were detected in several wells; in March 2026 they reached 4.92 mg/dm³ in GMW-1 and 5.07 mg/dm³ in GMW-2. The results demonstrate that the combined interpretation of groundwater level, temperature and hydrochemical indicators, together with the spatial relationship between wells and engineering networks, can identify zones of probable anthropogenic recharge. The existing monitoring network can therefore be used not only to document the consequences of known failures but also as an early-warning tool for detecting hidden leaks before obvious surface effects develop. This approach is especially relevant for heritage areas where prolonged infiltration can contribute to waterlogging, suffosion, subsidence and instability of loess soils. *Key words:* environmental monitoring; groundwater; hidden leaks; engineering networks; thermal anomaly; ammonium; Kyiv-Pechersk Lavra.

Постановка проблеми. Національний заповідник «Києво-Печерська лавра» є територією, де гідрогеологічні умови тісно пов'язані зі збереженням пам'яток архітектури, археологічних об'єктів, підземних споруд і музейної інфраструктури. Для Верхньої лаври характерним є складний рельєф, близькість зсувонебезпечних схилів, присутність підземних порожнин, наявність лесових ґрунтів у геологічному розрізі. У таких умовах навіть локальне перезволоження ґрунтового масиву може змінювати напружено-деформований стан основ споруд, сприяти просіданню, суфозії, утворенню провалів і збільшенню ризику активізації зсувних процесів [1–3].

Актуальність дослідження. Особливістю території є те, що природний режим ґрунтових вод тут спотворений довготривалим техногенним впливом міського середовища. До природних чинників належать атмосферні опади, сніготанення й безпосередньо спричинене ними інфільтраційне живлення, сезонні зміни температур, сонячної активності, величини евапотранспірації. До техногенних чинників належать витоки з водогонів, каналізаційних колекторів, тепломереж, зливової каналізації та дренажних систем [4–6].

Зовнішні міські водонесучі мережі, прокладені вздовж вул. Івана Мазепи, мають помітний вплив на режим ґрунтових вод району розташування свердловин ГСС-1, ГСС-2, ГСС-102, ГСС-103 і ГСС-111, які знаходяться на межі території Заповідника вздовж вулиці Івана Мазепи.

Для Верхньої Лаври найвищі абсолютні відмітки РҐВ спостерігаються вздовж вул. Івана Мазепи. Основний напрям руху ґрунтових вод орієнтований з північного заходу на південний схід, тобто від прилеглої міської забудови у напрямку схилу та долини Дніпра [3]. Це створює умови для поширення техногенних вод і розчинених забруднювальних речовин не лише в межах окремих аварійних ділянок, а й у межах охоронної зони Заповідника.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Робота продовжує багаторічний моніторинг гідрогеологічного режиму території Заповідника та спрямована на використання накопичених режимних спостережень для прикладного завдання раннього виявлення техногенного живлення водоносного горизонту. У дослідженні поєднано дані 2025–2026 рр., матеріали попередніх періодів, температурні та гідрохімічні спостереження, а також відомості про аварійні події на зовнішніх інженерних мережах. Така постановка задачі безпосередньо пов'язана із забезпеченням екологічної та інженерно-геологічної безпеки історичної території.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні підходи до екологічного моніторингу передбачають використання тривалих рядів інструментальних спостережень і мереж сенсорного контролю для виявлення змін стану природного середовища [7]. Оцінювання ефективності мереж спостережних свердловин у міському середовищі показує значення просторової репрезентативності та регулярності спостережень за ґрунтовими водами [8]. Для екологічно вразливих територій важливим є також поєднання моніторингових даних із просторовою оцінкою джерел ризику та напрямів поширення впливу [9, 10].

Окремий напрям досліджень стосується виявлення підземних витоків за температурними аномаліями. Показано можливість використання розподіленого температурного контролю, теплових полів і комплексних методів локалізації витоків у водній інфраструктурі [11–14]. Гідрохімічний моніторинг природних вод, своєю чергою, дає додаткові індикатори зміни якості води та техногенного навантаження [15]. Для території Києво-Печерської лаври багаторічний гідрогеологічний моніторинг уже продемонстрував зв'язок змін режиму ґрунтових вод з інженерно-геологічними умовами пам'яткового комплексу [3].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Наявні режимні спостереження на території Заповідника традиційно використовувалися переважно для контролю умов збереження пам'яток та інженерно-геологічної безпеки. Недостатньо опрацьованим залишається їх системне використання саме як комплексу індикаторів прихованих витоків, коли рівневі зміни зіставляються з температурою, хімічним складом, просторовим положенням свердловин і хронологією аварійних подій. Такий підхід необхідний для відокремлення природної сезонної мінливості від техногенних імпульсів та для визначення ділянок, де додаткове живлення водоносного горизонту може тривати без очевидних поверхневих проявів.

Новизна. Наукова новизна роботи полягає у комплексній інтерпретації багаторічних і сучасних режимних спостережень за ґрунтовими водами як системи ознак прихованих та повторних витоків. Діагностичне рішення базується не на одному параметрі, а на узгодженні рівневих, температурних і гідрохімічних аномалій із просторовим положенням свердловин відносно зовнішніх інженерних мереж та відомих аварійних зон.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічне значення полягає у застосуванні багатокритеріального підходу до інтерпретації режиму ґрунтових вод. Поєднання часових рядів рівня, температурних спостережень, гідрохімічних показників і просторового аналізу зменшує ризик помилкової інтерпретації одиничних аномалій. Запропонована логіка аналізу може використовуватися для моніторингових мереж інших урбанізованих та історико-культурних територій із щільною системою підземних комунікацій.

Метою статті є визначення ознак прихованих витоків із зовнішніх водонесучих інженерних мереж за просторово-часовими змінами рівня, температури та окремих гідрохімічних показників ґрунтових вод у верхній частині території Національного заповідника «Києво-Печерська лавра» за основним масивом спостережень 2025–2026 рр. із порівнянням із матеріалами моніторингу попередніх років.

Викладення основного матеріалу. Об’єктом дослідження є ґрунтові води верхньої частини території Національного заповідника «Києво-Печерська лавра» та прилеглої зони впливу зовнішніх водонесучих інженерних мереж. Предметом дослідження є зміни рівня ґрунтових вод, температури та хімічного складу, які можуть відображати надходження техногенних вод із водопровідних, каналізаційних і теплових мереж.

В аналіз включено свердловини, що належать до обраної для цієї статті верхньої частини Лаври: ГСС-1, ГСС-1а, ГСС-2, ГСС-3, ГСС-4, ГСС-5, ГСС-6, ГСС-7, ГСС-8, ГСС-9, ГСС-13, ГСС-101, ГСС-102, ГСС-103, ГСС-110, ГСС-111 і ГСС-257. Свердловини ГСС-14, ГСС-112, ГСС-16 та свердловини, розташовані східніше цієї межі на схемі спостережної мережі, у статистичний аналіз цієї статті не включалися. Окремо враховано, що зовнішні міські мережі вздовж вул. Івана Мазепи просторово пов’язані передусім із ГСС-1, ГСС-2, ГСС-102, ГСС-103 і ГСС-111.

Основний масив даних становлять результати режимних вимірювань РҐВ за 2025–2026 рр. Для зіставлення використано багаторічний ряд спостережень за 1996–2026 рр. і порівняльний період 2024–2025 рр. Окремо проаналізовано температурні вимірювання у тих свердловинах, для яких наявні синхронні або близькі за часом температурні спостереження. Температура ґрунтових вод розглядалася як діагностичний показник можливого надходження підігрітих вод із теплових мереж та мереж побутової каналізації, що узгоджується з підходами до виявлення витоків за тепловими аномаліями [4, 5, 11–14].

Результати гідрохімічних досліджень, виконаних у межах моніторингової програми, використано як додатковий блок даних. Особливу увагу приділено вмісту іонів амонію NH_4^+, а також наявності підвищених концентрацій хлоридів, нітратів, сульфатів, загального заліза, свинцю, кальцію, магнію та загальної мінералізації. Такі показники не є самодостатнім доказом конкретного місця аварії, однак у поєднанні з рівневими й температурними аномаліями вони посилюють вірогідність техногенного походження вод [15–17].

Статистична обробка включала визначення середніх, мінімальних і максимальних значень РҐВ, амплітуди їх коливань, орієнтовного тренду зміни рівня за 30 діб і зіставлення цих характеристик із подіями, описаними у журналі аварійних ситуацій. Аномальними вважалися не поодинокі відхилення, а комбінації ознак: швидкий підйом РҐВ, тривале утримання підвищених відміток, підвищена температура ґрунтової води, просторовий збіг із розміщенням зовнішніх мереж і наявність хімічних індикаторів техногенного впливу.

Багаторічна динаміка РҐВ показує, що природний режим ґрунтових вод має сезонну складову, однак у межах Верхньої Лаври на неї накладаються техногенні імпульси. Для природного режиму очікуваними є відносно плавні підйоми після періодів інтенсивного живлення та подальше зниження [4–6]. Натомість швидке зростання рівня на десятки сантиметрів і більше, особливо за короткий проміжок часу та в кількох свердловинах однієї просторової зони, є підставою розглядати вплив аварійних витоків. На рис. 1 видно не лише різницю абсолютних відміток між свердловинами, а й зміну характеру коливань у часі.

Найвищі рівні стабільно фіксуються у ГСС-2, тоді як ГСС-1, ГСС-102, ГСС-111 і частково ГСС-110 займають проміжне положення між найвищими відмітками вздовж вул. Івана Мазепи та нижчими ділянками внутрішньої частини території. Варто вказати, що для ГСС-2 і ГСС-6 різкі падіння РҐВ викликані відкачуванням води і не є репрезентативними у даному випадку. ГСС-257 має помітно нижчі абсолютні відмітки, тому її включення до графіка розширює вертикальний масштаб, але дає можливість показати контраст між різними частинами зони спостережень на Верхній Лаврі. Незвичними на графіку є не плавні сезонні коливання, а різкі підйоми та тривале утримання підвищених рівнів, особливо після аварійних періодів 2023 і 2025 рр. Саме такі ділянки потребують зіставлення з даними про аварії на інженерних мережах, оскільки вони не відповідають простій сезонній зміні живлення водоносного горизонту.

Умовні позначення до рис. 2: 1 – гідрогеологічні спостережні свердловини (ГСС); 2 – гідроізогіпси

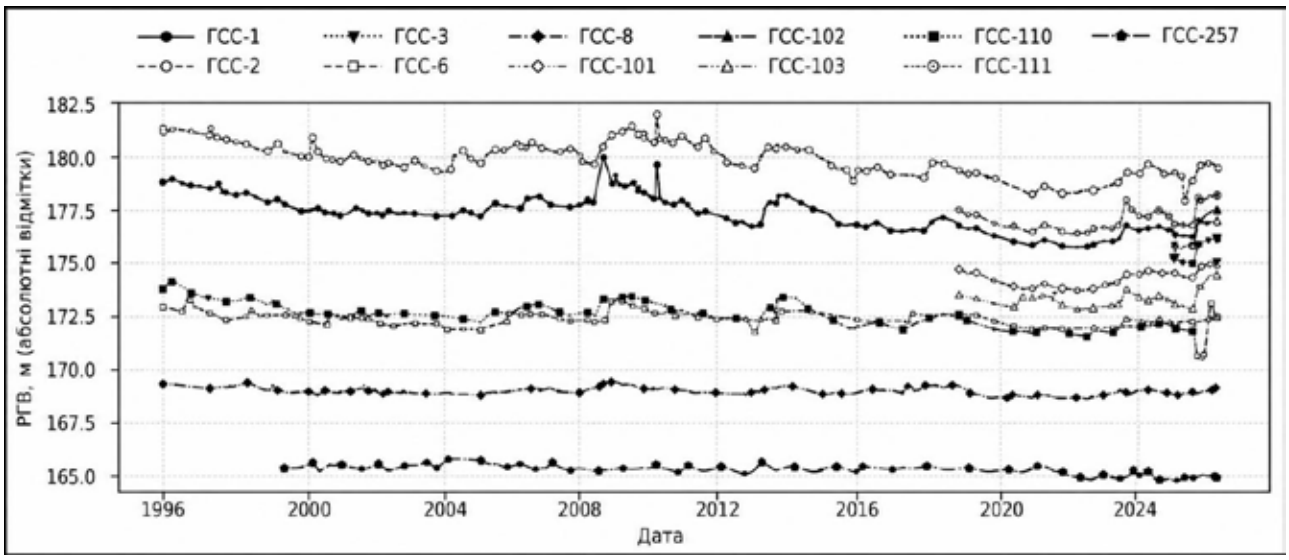


Рис. 1. Багаторічна динаміка рівня ґрунтових вод у вибраних спостережних свердловинах верхньої частини Лаври за 1996–2026 рр.

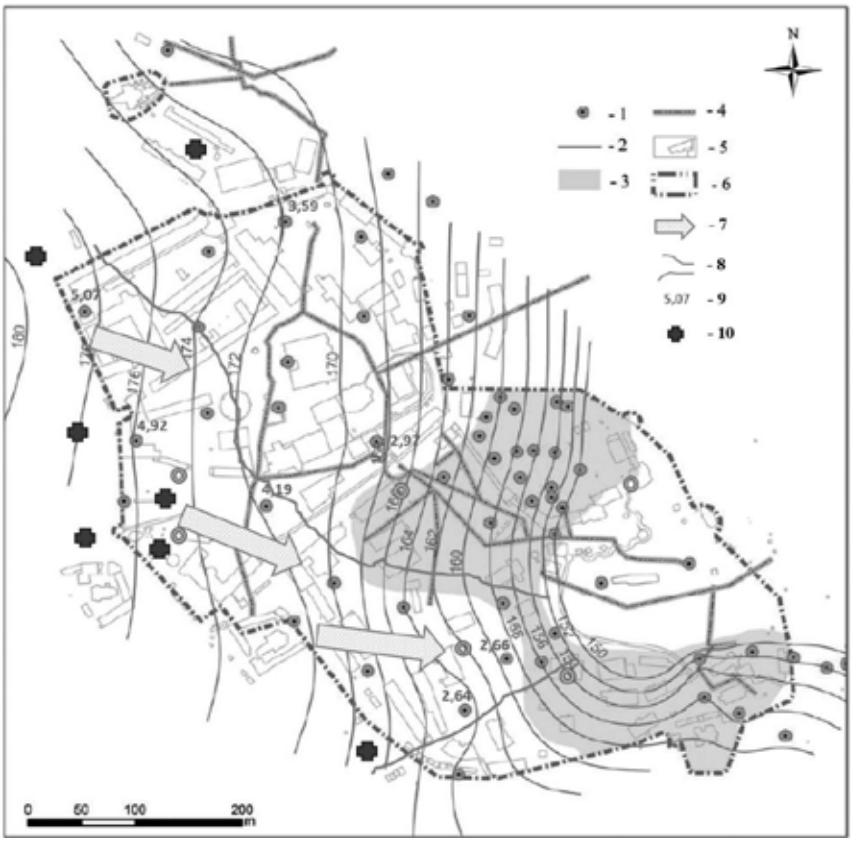


Рис. 2. Карта поширення техногенних вод і вмісту NH_4^+ у спостережних свердловинах станом на березень 2026 р. [18]

РҐВ; 3 – площа розповсюдження тимчасового (сезонного) водоносного горизонту; 4 – дренажі глибокого закладання (ДШС); 5 – будівлі; 6 – межі заповідника; 7 – напрямки поширення куполів розтікання техногенних вод; 8 – межі розтікання техногенних вод; 9 – вміст NH_4^+ у спостережних свердловинах, мг/дм³; 10 – місця значних аварійних витоків з інженерних мереж.

Зіставлення з переліком аварій за останні роки показує, що найбільш показовими є події, пов'я-

зані з магістральними мережами вздовж вул. Івана Мазепи та на розі вул. Івана Мазепи і Цитадельної. У лютому 2018 р. аварія магістральної тепломережі спричинила затоплення підвальних приміщень прилеглих об'єктів. У лютому 2021 р. дві аварії тепломережі призвели до перезволоження ґрунтового масиву, утворення провалів і підтоплення пам'яток. У жовтні 2022 р. аварійний порив тепломережі в Митрополичому саду супроводжувався утворенням великих провалів денної поверхні, затопленням підземної споруди та підйомом рівнів ґрунтових вод приблизно на 1,0 м. У липні-серпні 2023 р. близько десяти поривів водогону й тепломережі спричинили підйом РҐВ у ГСС-1, ГСС-2, ГСС-102 і ГСС-103 на 0,7–1,7 м. У серпні-жовтні 2025 р. більше десяти масштабних поривів зумовили підйом РҐВ у свердловинах, пов'язаних із вул. Івана Мазепи, на 1,2–2,0 м, а підвищені відмітки зберігалися протягом кількох місяців [18].

У межах основного періоду 2025–2026 рр. найбільш виразні зміни зафіксовано у ГСС-111, ГСС-2, ГСС-103, ГСС-102 і ГСС-110. Для ГСС-111 амплітуда коливань становила 2,39 м, а середній рівень у 2025–2026 рр. був на 0,88 м вищим порівняно з попереднім періодом. Для ГСС-102 середній рівень зріс на 0,48 м, а амплітуда збільшилася з 0,99 до 1,63 м. Для ГСС-103 середній рівень підвищився на 0,32 м, а амплітуда зросла з 0,77 до 1,87 м. Для ГСС-110 середнє значення зросло на 0,51 м, а амплітуда збільшилася з 0,30 до 1,37 м. Таке одночасне збільшення середніх рівнів та амплітуди у групі просторово пов'язаних свердловин узгоджується з припущенням про додаткове техногенне живлення водоносного горизонту.

Перелік свердловин на рис. 3 не є повним переліком усієї гідрогеологічної мережі Заповідника. На графік перенесено лише ті ГСС, які належать до обраної для цієї статті верхньої Лаври та потрібні для аналізу впливу зовнішніх мереж; ГСС-14, ГСС-112, ГСС-16 і свердловини східніше цієї межі не включалися до статистичного зіставлення.

На рис. 3 добре простежується, що група свердловин у зоні вул. Івана Мазепи реагує контрастніше за внутрішні ділянки. ГСС-2 зберігає найвищі абсолютні відмітки, однак діагностично важливішими є різкі зміни у ГСС-102, ГСС-103, ГСС-110 і ГСС-111 після серпня-вересня 2025 р. Після короткочасних спадів у частині свердловин рівні знову починають підніматися або утримуються вище попереднього фонового рівня, що може свідчити про неодноразові або пролонговані витоки. Саме така поведінка РҐВ є небезпечною для лесових ґрунтів, оскільки тривале перезволоження може сприяти просіданню, розвитку суфозійних процесів і появі локальних провалів.

Набір свердловин, за яким побудовано графік рис. 4, менший за повний перелік свердловин спостережної мережі Заповідника. Температурні криві на графіку рис. 4 побудовано лише для тих ГСС Верхньої Лаври, де були доступні температурні вимірювання, отже для побудови рис. 4 використано дані меншої кількості свердловин, ніж наведено на рис. 3.

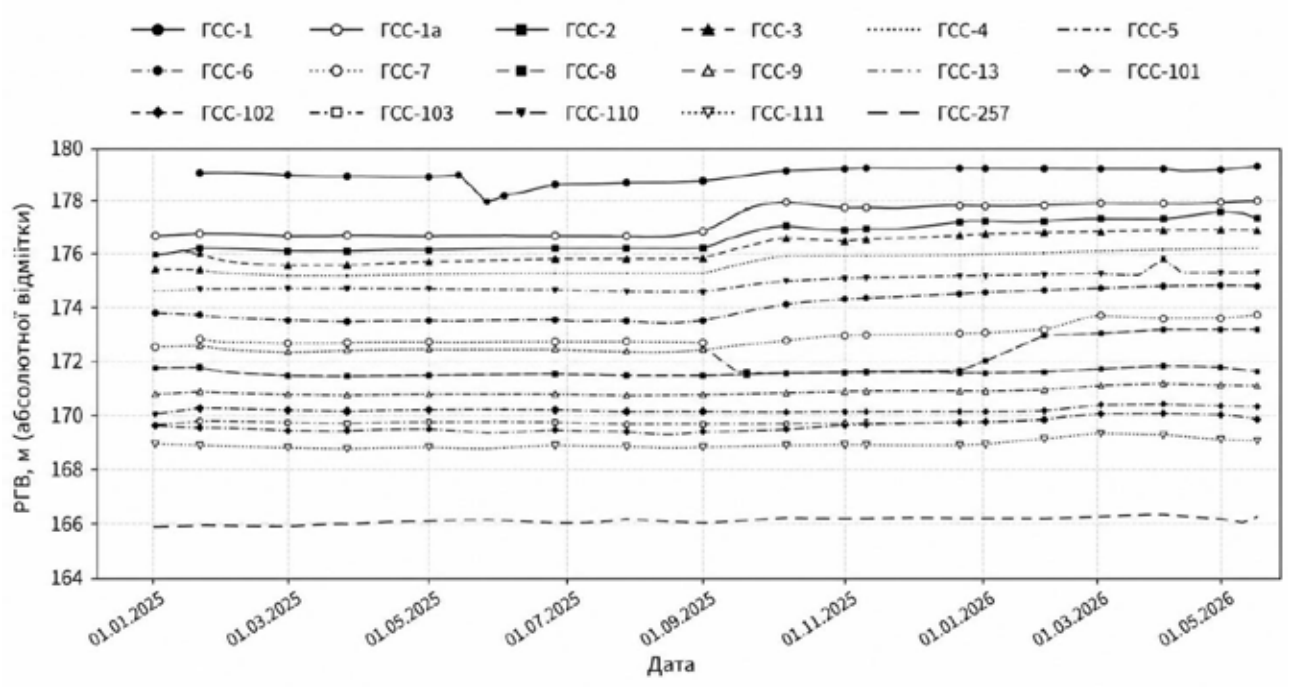


Рис. 3. Динаміка рівнів ґрунтових вод у вибраних свердловинах верхньої частини Лаври у 2025–2026 рр.

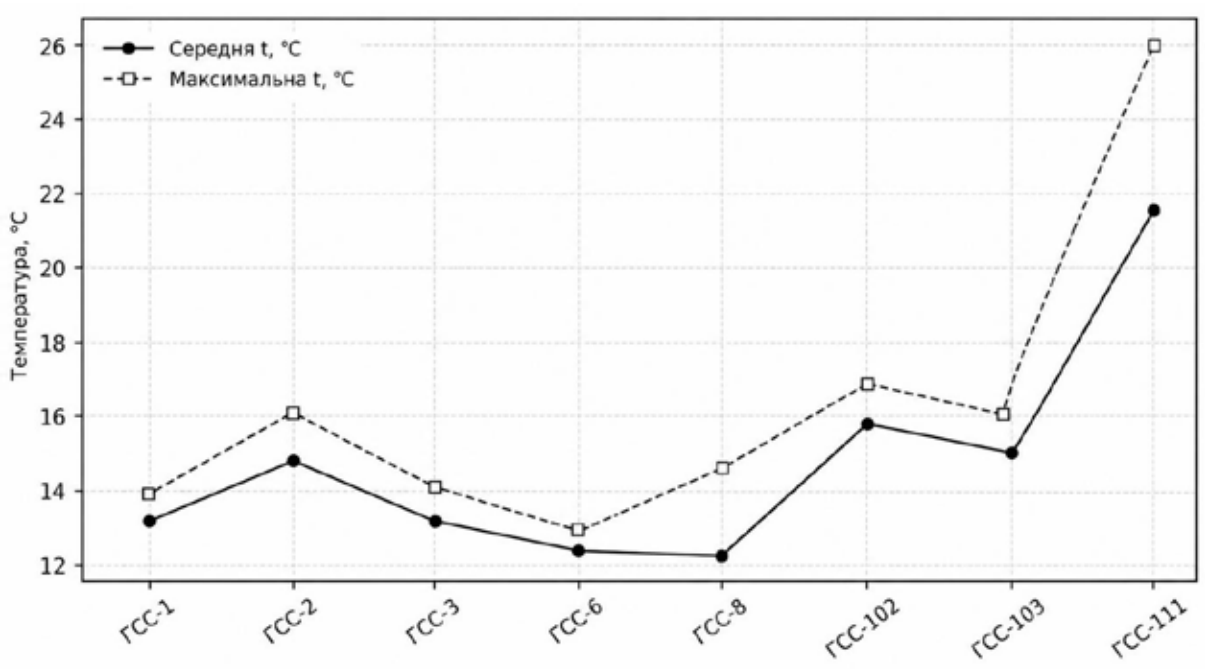


Рис. 4. Середні та максимальні температури ґрунтових вод у свердловинах, для яких наявні температурні вимірювання у 2025–2026 рр.

Температурні дані посилюють впевненість у наявності техногенного впливу. Найбільш вираженим це є для ГСС-111, де середня температура становила 21,59 °С, а максимальна досягала 26,00 °С. Це значно вище природного температурного фону ґрунтових вод, який для території Заповідника в матеріалах моніторингу оцінюється переважно в межах 8–13 °С залежно від глибини та сезону. Підвищені температури також характерні для ГСС-102 (середня 15,83 °С, максимальна 16,80 °С), ГСС-103 (15,12 і 16,00 °С) та ГСС-2 (14,84 і 16,00 °С). Поєднання підйому рівня з температурною аномалією є більш переконливим індикатором витоку з тепломереж, ніж аналіз лише рівня або лише температури [11, 13, 14].

За таблицями 1–2 видно, що найвища амплітуда у 2025–2026 рр. зафіксована у ГСС-111 (2,39 м), ГСС-103 (1,87 м), ГСС-102 (1,63 м) і ГСС-110 (1,37 м). При цьому для виявлення можливих аварій важливо враховувати не лише абсолютну амплітуду, а й просторову позицію свердловини. ГСС-2, ГСС-102, ГСС-103 і ГСС-111 розташовані у зоні впливу вул. Івана Мазепи, де зафіксовано повторні аварії мереж. ГСС-111 додатково вирізняється найвищою температурою води, що робить її одним з ключових елементів моніторингової мережі для фіксації можливого впливу тепломереж та каналізації. ГСС-102 і ГСС-103 демонструють одночасне зростання середнього рівня та амплітуди, що відповідає моделі тривалого або повторного техногенного впливу. ГСС-257 має нижчі абсолютні рівні й невелику амплітуду 0,49 м, тому в межах цього масиву даних вона не є головним індикатором аварій, але залишається важливим елементом спостережної мережі для контролю режиму ґрунтових вод Верхньої Лаври.

Результати гідрохімічних досліджень, виконаних у межах моніторингової програми, показують, що рівневі й температурні аномалії супроводжуються змінами складу води. Найбільш показовим індикатором, на думку авторів статті, є присутність солей NH_4^+. Амоній може надходити зі стічними водами побутової каналізації, але також може формуватися внаслідок процесів відновлення у забрудненому водоносному горизонті, тому його слід інтерпретувати разом із просторовим положенням свердловини, напрямом потоку та іншими хімічними показниками, що відповідає принципам комплексного моніторингу якості природних вод [15, 17]. У ГСС-1 концентрація NH_4^+ зросла до 4,92 мг/дм³ у березні 2026 р., у ГСС-2 – до 5,07 мг/дм³, у ГСС-3 – до 4,19 мг/дм³, у ГСС-6 – до 3,59 мг/дм³, а в ГСС-8 у березні 2026 р. зафіксовано 2,97 мг/дм³, хоча при перевірці в травні та жовтні аміак виявлявся. Така динаміка може свідчити або про збереження джерела забруднення, або про розширення зони впливу техногенних вод.

Окрім NH_4^+, за матеріалами досліджень хімічних властивостей ґрунтових вод виявлено перевищення або підвищені значення для хлоридів, нітратів, сульфатів, загального заліза, свинцю, загальної мінералізації, а також високі концентрації кальцію і магнію. У ГСС-1, ГСС-2, ГСС-3, ГСС-102, ГСС-103 і ГСС-110 зазначалися підвищені концентрації Ca^{2+} до 760 мг/дм³ при нормативному рівні менше 130 мг/

Таблиця 1

Узагальнені статистичні показники рівня та температури ґрунтових вод за 2025–2026 рр.

Свердловина	Сер. РҐВ, м	Ампл. РҐВ, м	Тренд РҐВ, м/30 діб	Сер. t, °C	Макс. t, °C	r(РҐВ;t)
ГСС-1	176,54	0,93	0,06	13,26	13,90	-0,54
ГСС-1а	173,91	0,42	-0,00	–	–	–
ГСС-2	179,27	1,94	0,05	14,84	16,00	0,61
ГСС-3	172,06	0,87	0,05	13,35	14,20	-0,95
ГСС-4	170,38	0,16	0,00	–	–	–
ГСС-5	174,92	1,18	0,02	–	–	–
ГСС-6	172,08	2,49	0,03	12,45	13,00	-0,90
ГСС-7	169,06	0,72	-0,02	–	–	–
ГСС-8	168,98	0,62	0,03	12,21	14,70	-0,41
ГСС-9	169,33	0,60	0,02	–	–	–
ГСС-13	170,51	0,42	0,02	–	–	–
ГСС-101	174,39	0,68	0,04	–	–	–
ГСС-102	177,41	1,63	0,12	15,83	16,80	-0,67
ГСС-103	173,36	1,87	0,12	15,12	16,00	-0,68
ГСС-110	175,40	1,37	0,09	–	–	–
ГСС-111	176,41	2,39	0,15	21,59	26,00	0,18
ГСС-257	164,84	0,49	0,01	–	–	–

Таблиця 2

Порівняння режиму РҐВ у 2024–2025 та 2025–2026 рр.

Свердловина	Сер. 2024–2025, м	Сер. 2025–2026, м	Δ сер., м	Ампл. 2024–2025, м	Ампл. 2025–2026, м
ГСС-1	176,32	176,54	0,21	0,53	0,93
ГСС-1а	174,08	173,91	-0,17	0,26	0,42
ГСС-2	179,25	179,27	0,02	0,51	1,94
ГСС-3	172,02	172,06	0,04	0,56	0,87
ГСС-4	170,35	170,38	0,04	0,21	0,16
ГСС-5	174,79	174,92	0,13	0,15	1,18
ГСС-6	172,05	172,08	0,03	0,19	2,49
ГСС-7	169,21	169,06	-0,16	0,22	0,72
ГСС-8	168,92	168,98	0,06	0,45	0,62
ГСС-9	169,28	169,33	0,05	0,28	0,60
ГСС-13	170,52	170,51	-0,02	0,28	0,42
ГСС-101	174,27	174,39	0,13	0,33	0,68
ГСС-102	176,93	177,41	0,48	0,99	1,63
ГСС-103	173,04	173,36	0,32	0,77	1,87
ГСС-110	174,89	175,40	0,52	0,30	1,37
ГСС-111	175,53	176,41	0,88	0,55	2,39
ГСС-257	164,74	164,84	0,10	0,43	0,49

дм³ і Cl^- до 2070 мг/дм³ при нормативному рівні менше 300 мг/дм³, а загальна мінералізація сягала 2,5–3,5 г/дм³. Такі показники відповідають не фоновому природному стану, а змішаному техногенно зміненому складу вод, що може бути пов'язаний із впливом мереж водопостачання, теплопостачання та каналізації [16].

З екологічної точки зору небезпека полягає не лише у самому факті підйому РҐВ. Пролонгована інфільтрація витоків змінює водний і хімічний режим ґрунтового масиву, може збільшувати площу підтоплення, переносити розчинені забруднювальні речовини в напрямку схилу та створювати ризики для джерел, розташованих нижче по потоку ґрунтових вод. У разі подальшого поширення техногенних вод у напрямку долини Дніпра це можна вважати серйозною екологічною проблемою і моніторинг цього забруднення має розглядатися як частина шир-

Таблиця 3

Вміст іонів амонію NH_4^+ у ґрунтових водах, мг/дм³

Свердловина	Березень 2025	Травень 2025	Жовтень 2025	Березень 2026
ГСС-1	Не виявлено	Норма (<2,6)	3,07	4,92
ГСС-2	Не виявлено	3,25	3,12	5,07
ГСС-3	Не виявлено	3,50	2,89	4,19
ГСС-257	–	Норма (<2,6)	2,64	–
ГСС-6	–	–	–	3,59
ГСС-8	–	Не виявлено	Не виявлено	2,97

шого екологічного моніторингу, а не лише як інженерна проблема збереження фундаментів і підземних споруд [10, 19, 20].

Головні висновки.

1. Моніторинг режиму ґрунтових вод у верхній частині Національного заповідника «Києво-Печерська лавра» показав, що у 2025–2026 рр. найбільш виражені ознаки можливого техногенного впливу простежуються у ГСС-1, ГСС-2, ГСС-102, ГСС-103, ГСС-110 і ГСС-111. Саме ці свердловини демонструють підйом рівнів ґрунтових вод, збільшення амплітуди або просторовий зв'язок із зоною розміщення зовнішніх мереж уздовж вул. Івана Мазепи.

2. Найбільш інформативною для фіксації можливого впливу тепломереж є ГСС-111: у 2025–2026 рр. її амплітуда РҐВ становила 2,39 м, середній рівень зріс приблизно на 0,88 м порівняно з попереднім періодом, а максимальна температура води досягала 26,0 °С. ГСС-102 і ГСС-103 також є важливими елементами-індикаторами моніторингової мережі, оскільки поєднують зростання середнього рівня, збільшення амплітуди та підвищену температуру води.

3. ГСС-2 фіксує найвищі абсолютні відмітки РҐВ серед розглянутих свердловин і належить до зони впливу інженерних мереж, прокладених під вул. Івана Мазепи, тому її слід використовувати як одну з ключових свердловин для контролю за прихованими або повторними витоками. ГСС-1 також має значення як контрольний елемент моніторингової мережі, особливо з урахуванням зростання NH_4^+ до 4,92 мг/дм³ у березні 2026 р.

4. Потенційно несприятливі процеси, пов'язані з просіданням, суфозійним винесенням частинок і подальшими провалами, найбільш імовірні там, де підйом РҐВ поєднується з тривалим додатковим зволоженням лесових ґрунтів, наприклад внаслідок повторних аварій на мережах. За наявними даними до таких зон належать ділянки, пов'язані з ГСС-102, ГСС-103, ГСС-110 і ГСС-111, а також зона ГСС-2 уздовж вул. Івана Мазепи.

5. Хімічні дослідження підтверджують доцільність комплексного підходу. Підвищений вміст NH_4^+ у ГСС-1, ГСС-2, ГСС-3, ГСС-6 і ГСС-8, а також підвищені концентрації хлоридів, кальцію, магнію та загальної мінералізації у частині свердловин свідчать про техногенно змінений склад ґрунтових вод. Окремо ці показники не визначають точне джерело аварії, однак разом із рівневими й температурними аномаліями вони формують систему доказів техногенного впливу на геологічне середовище.

6. Практичне значення роботи полягає в тому, що багаторічні спостереження, які традиційно використовувалися для контролю стану пам'яток архітектури та інженерно-геологічної безпеки, можуть бути ефективно включені до системи екологічного моніторингу. Поєднання моніторингу рівня, температури й хімічного складу ґрунтових вод дає змогу не лише фіксувати наслідки вже відомих аварій, а й виявляти приховані витоки до появи очевидних поверхневих проявів.

Перспективи використання результатів дослідження. Подальше використання результатів доцільно спрямувати на формування порогових критеріїв раннього попередження для ключових свердловин, регулярне зіставлення автоматизованих вимірювань рівня й температури з журналом аварійних подій та розширення гідрохімічного контролю. Перспективним є також просторове простеження техногенних вод у напрямку природного потоку ґрунтових вод і оцінювання можливого впливу на ділянки, розташовані нижче за потоком. Накопичення синхронних рядів рівня, температури, хімічного складу та метеорологічних показників дасть змогу точніше відокремлювати сезонні зміни від техногенних імпульсів і підвищити оперативність виявлення прихованих витоків.

Література

1. Allam A. M., Ibrahim M. G., Kanae S., Sharaan M. Evaluating flood and landslide hazards to cultural heritage sites in Historic Cairo. Natural Hazards. 2025. Vol. 121, No. 13. P. 15491–15535. DOI: https://doi.org/10.1007/s11069-025-07401-1.
2. Bonini J. E., Parenti C., Grassi F., Mancini F., Vieira B. C., Soldati M. Assessing landslide susceptibility and dynamics at cultural heritage sites by integrating machine learning techniques and persistent scatterer interferometry. Geomorphology. 2025. Vol. 469. Article 109522. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109522.

3. Cherevko I., Kril T., Bugai D., Shekhunova S. Impact of hydrogeological factors on geotechnical conditions of the Kyiv-Pechersk Lavra Monastery complex: Lessons from three decades of monitoring. Acque Sotterranee – Italian Journal of Groundwater. 2024. Vol. 13, No. 3. P. 91–101. DOI: https://doi.org/10.7343/as-2024-765.
4. Hajnrych M., Blachowski J., Worsa-Kozak M. Analysis of groundwater temperature in urban conditions – the case of Wrocław, Poland. Civil and Environmental Engineering Reports. 2025. Vol. 35, No. 1. P. 213–229. DOI: https://doi.org/10.59440/ceer/200729.
5. Hajnrych M., Blachowski J., Worsa-Kozak M. Groundwater urban heat island (GUHI) and climate warming: Insights from two decades of monitoring in Wrocław. Water. 2025. Vol. 17, No. 21. Article 3090. DOI: https://doi.org/10.3390/w17213090.
6. Hostieva D., Trokhymenko G., Blahodatnyi V. Groundwater level dynamics and climate variability in the city of Mykolaiv. Environmental Problems. 2026. Vol. 11, No. 2. P. 179–189. DOI: https://doi.org/10.23939/ep2026.02.179.
7. Acevedo M. F. Real-time environmental monitoring: Sensors and systems. Boca Raton : CRC Press, 2024. DOI: https://doi.org/10.1201/9781003425496.
8. Bosserelle A. L., Hughes M. W. Groundwater monitoring infrastructure: Evaluation of the shallow urban and coastal network in Ōtautahi Christchurch. Journal of Hydrology: Regional Studies. 2024. Vol. 55. Article 101934. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101934.
9. Ma J., Li L., Jiao L., Zhu H., Liu C., Li F., Li P. Identifying ecological security patterns considering the stability of ecological sources in ecologically fragile areas. Land. 2024. Vol. 13, No. 2. Article 214. DOI: https://doi.org/10.3390/land13020214.
10. Malovanyy M., Antonov M., Kravets I., Holodovska O., Turkadze T. General analysis of the decline of the water resources system, water pollution and eco-monitoring in the context of global climate changes using Lviv region as the example. Environmental Problems. 2026. Vol. 11, No. 2. P. 250–259. DOI: https://doi.org/10.23939/ep2026.02.250.
11. D'Aniello A. Detecting background leakages in water infrastructure with fiber optic distributed temperature sensing: Insights from a heat transfer-unsaturated flow model. Water Resources Management. 2023. Vol. 37. P. 5535–5558. DOI: https://doi.org/10.1007/s11269-023-03617-7.
12. Farah E., Shahrour I. Water leak detection: A comprehensive review of methods, challenges, and future directions. Water. 2024. Vol. 16, No. 20. Article 2975. DOI: https://doi.org/10.3390/w16202975.
13. Islam M. R., Azam S., Shanmugam B., Mathur D. Leak detection and localization in underground water supply system using thermal imaging and geophone signals through machine learning. Intelligent Systems with Applications. 2024. Vol. 23. Article 200404. DOI: https://doi.org/10.1016/j.iswa.2024.200404.
14. Li P., Tang L., Zhang S., Ming P., Wang Y., Tian H. Research progress on temperature field leakage detection of earth-rock dams and new exploration in leakage point detection. Nondestructive Testing and Evaluation. 2024. Vol. 39, No. 5. P. 1009–1029. DOI: https://doi.org/10.1080/10589759.2023.2280896.
15. Krykhovets O., Repeta V., Ivashchenko I. Monitoring of spring water quality. Environmental Problems. 2025. Vol. 10, No. 2. P. 127–134. DOI: https://doi.org/10.23939/ep2025.02.127.
16. Про затвердження Державних санітарних норм та правил «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» (ДСанПіН 2.2.4-171-10) : наказ Міністерства охорони здоров'я України від 12.05.2010 № 400. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text (дата звернення: 19.08.2026).
17. Yaroshenko K. K., Koliabina I. L., Saprykin V. Yu., Molochkova N. M., Dramaretskyi Ye. O. Monitoring of the groundwaters chemical composition on the territory of the National Conservation Area "Sophia of Kyiv". Mineralogical Journal (Ukraine). 2026. Vol. 48, No. 1. P. 90–102. DOI: https://doi.org/10.15407/mineraljournal.48.01.090.
18. Черевко І. А., Саприкін В. Ю., Ярошенко К. К., Тараненко А. С. Дослідження впливу витоків з зовнішніх інженерних мереж на зміну гідрогеологічних умов території Національного заповідника «Києво-Печерська Лавра». XXIV Міжнародна наукова конференція «Церква – Наука – Суспільство: питання взаємодії» : матеріали конференції. Київ, 2026. С. 192–199. URL: https://www.researchgate.net/publication/410601020_Doslidzenna_vplivu_vitokiv_z_zovnisnih_inzenernih_merez_na_zminu_gidrogeologicnih_umov_teritorii_Nacionalnogo_zapovidnika_Kievo-Pecerska_Lavra (дата звернення: 19.08.2026).
19. Про охорону навколишнього природного середовища : Закон України від 25.06.1991 № 1264-XII. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text (дата звернення: 19.08.2026).
20. Stepova O., Shara S. Monitoring and revitalization technologies of Dnipro reservoirs. Environmental Problems. 2025. Vol. 10, No. 4. P. 319–324. DOI: https://doi.org/10.23939/ep2025.04.319.

Дата першого надходження статті до видання: 27.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ НАСЛІДКІВ ВОЄННИХ ДІЙ

УДК 598.2:631.523.2:598.3
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.14

ГЕОПРОСТОРОВИЙ АНАЛІЗ ЕКОЛОГІЧНИХ НАСЛІДКІВ ВОЄННИХ ДІЙ НА ТЕРИТОРІЯХ МІСТ ПОКРОВСЬК, МИРНОГРАД І ЧАСІВ ЯР ЗА ДАНИМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

Артеменко Н.Ф. (orcid.org/0009-0004-9679-7612),
Присяжний В.І. (orcid.org/0000-0001-7825-9037),
Морозова Т.В. (orcid.org/0000-0003-4836-1035)
Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»
вул. Василя Липківського, 35/2, 02000, Київ
erdu@urk.net

Окреслено і вивчено проблеми екологічних наслідків воєнних дій на територіях міст Покровськ, Мирноград і Часів Яр із використанням даних дистанційного зондування Землі та геоінформаційного аналізу. Актуальність дослідження обумовлена необхідністю оперативного отримання достовірної інформації про зміни природних і антропогенних компонентів довкілля в умовах обмеженого доступу до територій активних бойових дій. Особливу увагу приділено промисловим містам Донецької області, де воєнний вплив поєднується з високим рівнем техногенного навантаження, пов'язаного з функціонуванням підприємств вугільної промисловості, транспортної інфраструктури та потенційними ризиками затоплення шахт.

Метою дослідження є оцінювання екологічних наслідків воєнних дій на територіях досліджуваних міст шляхом інтегрованого використання супутникових даних, спектральних індексів і геоінформаційних технологій. Інформаційну основу дослідження становлять багатоспектральні знімки Sentinel-2 MSI, радіолокаційні дані Sentinel-1 SAR, супутникові матеріали Landsat 8–9, дані NASA FIRMS щодо активних пожеж, а також відкриті геопросторові дані OpenStreetMap, Copernicus Land Monitoring Service, Humanitarian Data Exchange та ACLED. Для аналізу використано систему спектральних індексів NDVI, ΔNDVI, NDWI, MNDWI, NBR, dNBR, NDBI та BSI, що забезпечують комплексний аналіз змін рослинного покриву, водних об'єктів, забудованих територій, згарищ і відкритих ґрунтів.

Запропоновано комплексну методику просторово-часового аналізу, яка поєднує попередню обробку супутникових даних, розрахунок спектральних індексів, інтеграцію растрових і векторних геопросторових даних, багаточасове порівняння та картографічне узагальнення результатів. Методика передбачає використання часових зрізів за 2021–2026 роки, що забезпечує порівняння довоєнного стану територій із сучасними змінами, спричиненими воєнними діями. Сформовано алгоритм обробки даних і систему взаємозв'язків між джерелами інформації, спектральними показниками та результатами просторового аналізу.

Практичне значення запропонованого підходу полягає у можливості оперативного виявлення територій із найбільш вираженими екологічними змінами, підтримці екологічного моніторингу, обґрунтуванні пріоритетів польових обстежень і післявоєнного відновлення, а також формуванні геопросторової доказової бази для прийняття управлінських рішень у сфері охорони довкілля. *Ключові слова:* дистанційне зондування Землі; воєнні дії; екологічні наслідки; геоінформаційний аналіз; Sentinel-2; Sentinel-1; Landsat; NASA FIRMS; спектральні індекси; Покровськ; Мирноград; Часів Яр; просторово-часовий аналіз.

Spatio-Temporal Geospatial Assessment of the Environmental Impacts of Warfare in Pokrovsk, Myrnohrad, and Chasiv Yar Using Earth Remote Sensing Data. Artemenko N., Prysiazhnyi V., Morozova T.

This study is devoted to assessing the environmental impacts of warfare in the cities of Pokrovsk, Myrnohrad, and Chasiv Yar using Earth remote sensing data and geospatial analysis. The relevance of the research is driven by the need for rapid and reliable information on changes in natural and anthropogenic environmental components under conditions of restricted access to active combat zones. Particular attention is paid to the industrial cities of the Donetsk region, where military impacts are compounded by a high level of technogenic pressure associated with coal mining, transport infrastructure, and the potential risks of mine flooding.

The aim of the study is to assess the environmental impacts of warfare in the selected urban areas through the integrated use of satellite imagery, spectral indices, and geospatial technologies. The information base includes Sentinel-2 MSI multispectral imagery, Sentinel-1 SAR radar data, Landsat 8–9 satellite imagery, NASA FIRMS active fire data, and open geospatial datasets from OpenStreetMap, the Copernicus Land Monitoring Service, the Humanitarian Data Exchange (HDX), and the Armed Conflict Location & Event Data Project (ACLED). A set of spectral indices, including NDVI, ΔNDVI, NDWI, MNDWI, NBR, dNBR, NDBI, and BSI, was applied to comprehensively analyse changes in vegetation cover, water bodies, built-up areas, burned areas, and exposed soils.

© Артеменко Н.Ф., Присяжний В.І., Морозова Т.В., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

A comprehensive spatio-temporal assessment methodology is proposed that integrates satellite data preprocessing, spectral index calculation, raster and vector geospatial data integration, multi-temporal comparison, and cartographic visualization. The methodology is based on annual observation periods covering 2021–2026, enabling comparisons between pre-war environmental conditions and wartime changes. A workflow for data processing and an integrated framework linking data sources, spectral indicators, and geospatial analysis results were developed.

The proposed approach provides an effective tool for the rapid identification of areas experiencing the most significant environmental changes, supports environmental monitoring, facilitates the prioritization of field surveys and post-war recovery planning, and contributes to the development of a geospatial evidence base for environmental decision-making. *Key words:* Earth remote sensing; environmental impacts of warfare; geospatial analysis; satellite monitoring; Sentinel-2; Sentinel-1; Landsat 8–9; NASA FIRMS; spectral indices; Pokrovsk; Myrnohrad; Chasiv Yar; spatio-temporal analysis.

Вступ. Повномасштабна збройна агресія Російської Федерації проти України спричинила масштабні зміни природного та антропогенного середовища, наслідки яких виходять далеко за межі безпосередньої зони бойових дій. Руйнування промислових підприємств, транспортної та комунальної інфраструктури, виникнення пожеж, забруднення ґрунтів продуктами вибухів і горіння, пошкодження водогосподарських систем, деградація рослинного покриву та трансформація структури землекористування формують комплекс взаємопов'язаних екологічних ризиків, що потребують системного дослідження [1].

Вибір Покровська, Мирнограда і Часового Яру зумовлений поєднанням інтенсивних бойових дій, високої концентрації об'єктів вугільної промисловості, значного антропогенного навантаження та різного ступеня трансформації міського середовища, що робить ці території репрезентативними для дослідження екологічних наслідків війни у промислових регіонах України.

Особливої уваги потребують території Донецької області, де бойові дії відбуваються в межах одного з найбільших індустріальних районів Європи. Міста Покровськ, Мирноград і Часів Яр характеризуються високою концентрацією підприємств вугільної промисловості, транспортної інфраструктури, енергетичних об'єктів та урбанізованих територій. У цьому регіоні воєнний вплив поєднується з історично сформованим техногенним навантаженням, зокрема ризиками затоплення шахт, забруднення поверхневих і підземних вод, просідання земної поверхні та накопичення токсичних речовин. Після початку повномасштабної війни ці ризики суттєво посилилися через пошкодження шахтної, енергетичної та водогосподарської інфраструктури [2].

За таких умов традиційні методи польового екологічного моніторингу є суттєво обмеженими, тому дедалі більшого значення набувають дистанційне зондування Землі, геоінформаційні технології та інтегровані підходи до просторового аналізу екологічних змін [3, 7, 8]. Це зумовлює необхідність використання технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), які забезпечують оперативне отримання об'єктивної просторової інформації незалежно від доступності території дослідження. Сучасні супутникові системи дають змогу здійснювати багаторічний моніторинг екологічних змін, аналізувати просторову структуру земного покриву, виявляти згарища, оцінювати стан рослинності, водних об'єктів і забудованих територій, а також відстежувати наслідки бойових дій у часовій динаміці [1].

Проведений аналіз сучасних наукових публікацій свідчить, що дослідження екологічних наслідків війни в Україні активно розвиваються за кількома напрямами. У працях українських учених Герасимчук Л. О. [9], Кононенка В. П. [10], Кучера В. О. [11], Трегуба О. А. [12], Балюка С. А. [13] розглянуто вплив бойових дій на ґрунтовий покрив, природні екосистеми, промислові території та окремі компоненти довкілля. Войтюк Д. і Гроза Д. [14] обґрунтовують необхідність моніторингу лісових екосистем, які зазнали пожеж, механічних пошкоджень та мінного забруднення. У роботах Нікітченко І., Прокопенка Н., Шведчикової І. [14] і Цимбалюк К. [15] основну увагу приділено проблемам післявоєнного відновлення водних екосистем та управління водними ресурсами.

Паралельно активно розвиваються дослідження, що базуються на використанні технологій дистанційного зондування Землі. Найбільшого поширення набули багатоспектральні дані Sentinel-2 для аналізу рослинності, відкритих ґрунтів, водних поверхонь і згарищ, радіолокаційні дані Sentinel-1 для виявлення структурних змін земної поверхні незалежно від погодних умов, архівні матеріали Landsat для аналізу довгострокових змін земного покриву, а також дані NASA FIRMS для моніторингу активних пожеж і термальних аномалій. Комплексне використання цих інформаційних ресурсів забезпечує більш повне виявлення екологічних змін та дедалі ширше застосовується у міжнародних дослідженнях воєнного впливу на довкілля [4, 7].

Незважаючи на активний розвиток супутникового моніторингу та створення міжнародних платформ (Copernicus EMS, Joint Research Centre, NASA FIRMS), більшість досліджень зосереджена на документуванні окремих типів пошкоджень або загальному аналізі екологічних наслідків війни. Комплексні методики просторово-часового аналізу, що інтегрують багатоспектральні, радіолокаційні й термальні супутникові дані із системою спектральних індексів для оцінювання екологічних змін на промислово урбанізованих територіях, висвітлено недостатньо. Особливо це стосується міст Покровськ, Мирноград і Часів Яр, де воєнний

вплив поєднується зі значним техногенним навантаженням вугільного регіону [5].

Незважаючи на значний розвиток супутникового моніторингу та створення міжнародних інформаційних платформ для картографування воєнних пошкоджень, більшість досліджень зосереджена на документуванні окремих типів руйнувань або загальному оцінюванні територій. Водночас комплексні методики просторово-часового аналізу, що інтегрують багатоспектральні, радіолокаційні та термальні супутникові дані із системою спектральних індексів для промислових територій Донбасу, залишаються недостатньо розробленими [6-8].

У зв'язку з цим **метою дослідження** є оцінювання екологічних наслідків воєнних дій на територіях міст Покровськ, Мирноград і Часів Яр із використанням даних дистанційного зондування Землі та геоінформаційного аналізу. Для досягнення поставленої мети передбачено обґрунтувати інформаційну базу дослідження, сформувати систему спектральних індексів для аналізу рослинного покриву, водних об'єктів, згарищ, забудованих територій та відкритих ґрунтів, розробити методику просторово-часового аналізу екологічних змін і визначити підходи до інтерпретації отриманих результатів.

Матеріали та методи дослідження.

Інформаційна база дослідження. Для забезпечення порівнянності результатів часові межі дослідження охоплюють 2021–2026 рр. Базовим (довоєнним) періодом обрано 2021 рік, який характеризує вихідний стан досліджуваних територій до початку повномасштабної збройної агресії рф проти України. Період 2022–2026 рр. використано для виявлення просторово-часових змін, пов'язаних із бойовими діями, руйнуванням міської інфраструктури, виникненням пожеж, порушенням ґрунтового покриву, деградацією рослинності, трансформацією водних об'єктів та іншими проявами воєнного впливу на довкілля.

Інформаційну основу дослідження становить комплекс відкритих супутникових і геопросторових даних різної фізичної природи. Основним джерелом є багатоспектральні супутникові знімки Sentinel-2 MSI Level-2A Surface Reflectance, які використовуються для розрахунку спектральних індексів NDVI, NDWI, MNDWI, NBR, dNBR, NDBI та BSI. Радарні дані Sentinel-1 SAR застосовуються для аналізу структурних змін земної поверхні, руйнування забудови та інфраструктури незалежно від погодних умов. Для виявлення пожеж і термальних аномалій використовуються дані NASA FIRMS, сформовані на основі супутникових спостережень MODIS і VIIRS. Як додаткове джерело застосовуються матеріали Landsat 8-9, які забезпечують аналіз довгострокових змін земного покриву та температури земної поверхні.

Для просторової інтерпретації результатів використовуються відкриті векторні дані OpenStreetMap, Copernicus Land Monitoring Service, адміністративні межі територій, а також відкриті геопросторові бази даних щодо транспортної інфраструктури, промислових підприємств, шахтних майданчиків, териконів, водних об'єктів і зелених зон. Для просторово-часового зіставлення екологічних змін з інтенсивністю бойових дій використовуються відкриті дані ACLED. Вихідні супутникові та геопросторові дані, використані в дослідженні, наведено в таблиці 1.

Інформаційна база дослідження сформована за принципом інтеграції багатоджерельних супутникових та геопросторових даних, що забезпечує комплексний аналіз екологічних наслідків воєнних дій. Поєднання оптичних, радіолокаційних, термальних і векторних даних дає змогу підвищити достовірність інтерпретації результатів, мінімізувати обмеження окремих джерел інформації та забезпечити просторово-часове зіставлення змін різних компонентів довкілля.

Часові межі та просторовий дизайн дослідження. Просторово-часовий аналіз ґрунтується на порівнянні шести часових зрізів, що охоплюють довоєнний період, початкову фазу повномасштабної війни, етап накопичення змін та сучасний стан досліджуваних територій. Такий підхід забезпечує можливість простежити динаміку трансформації природного й антропогенного середовища та відокремити короткострокові зміни від довготривалих екологічних наслідків.

Часові зрізи супутникового моніторингу наведено в таблиці 2.

Для забезпечення коректності міжрічного порівняння супутникові знімки відбиралися переважно за однаковий фенологічний період (травень–вересень), що мінімізує вплив сезонної мінливості рослинного покриву, вологості ґрунту та водних об'єктів на значення спектральних індексів.

Система спектральних індексів. Для кількісного аналізу екологічних змін використовувалася система спектральних індексів, що характеризують стан рослинного покриву, водних об'єктів, згарищ, відкритих ґрунтів і забудованих територій. Комплексне застосування індексів забезпечує можливість аналізу різних компонентів довкілля та їх трансформації під впливом воєнних дій. Перелік спектральних індексів, їх формули та практичне призначення наведено в таблиці 3.

Методика просторово-часового аналізу. Запропонована методика передбачає послідовне поєднання багатоспектрального, радіолокаційного, термального та геоінформаційного аналізу, що забезпечує комплексне виявлення екологічних наслідків воєнних дій, їх просторово-часову інтерпретацію та картографування. Послідовність основних етапів обробки супутникових і геопросторових даних, а також формування результатів оцінювання екологічних наслідків воєнних дій наведено на рисунку 1.

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

Таблиця 1

Вихідні супутникові та геопросторові дані, використані в дослідженні

Джерело даних	Основні характеристики	Період	Роль у методиці
Sentinel-2 MSI Level-2A	Оптичні дані, 13 спектральних каналів, 10/20/60 м	2021–2026	Розрахунок NDVI, NDWI, MNDWI, NBR, dNBR, NDBI, BSI; аналіз рослинності, водних об'єктів, згарищ, відкритих ґрунтів і забудови
Sentinel-1 SAR	C-band SAR, VV/VH, 10 м	2021–2026	Аналіз руйнувань забудови, змін шорсткості поверхні, деформацій та міської структури незалежно від погодних умов
Landsat 8–9 OLI/TIRS	Оптичні (30 м) і термальні канали	2021–2026	Аналіз довгострокових змін земного покриву, температури поверхні та верифікація результатів Sentinel-2
NASA FIRMS (MODIS/ VIIRS)	Точки активних пожеж і термальних аномалій	2021–2026	Виявлення осередків пожеж, аналіз згарищ та просторове зіставлення із зонами бойових дій
OpenStreetMap (OSM)	Векторні шари забудови, доріг, водних об'єктів, зелених зон, промислових територій	Актуальні дані	Просторова прив'язка результатів, аналіз інфраструктури та землекористування
Copernicus Land Monitoring Service	Тематичні шари земного покриву	Актуальні дані	Уточнення структури земного покриву та перевірка результатів класифікації
Адміністративні межі (HDX/OCHA)	Векторні полігони	Актуальні дані	Формування меж дослідження та картографування
Промислові об'єкти, шахти, терикони	Векторні геодані (OSM, відкриті бази даних)	Актуальні дані	Локалізація техногенних об'єктів і аналіз потенційних зон екологічного ризику
Дані про бойові дії (ACLED)	Просторово-часова база подій	2022–2026	Просторово-часове зіставлення екологічних змін з інтенсивністю бойових дій

Таблиця 2

Часові зрізи супутникового моніторингу, використані в дослідженні

Рік	Характеристика періоду	Мета аналізу
2021	довоєнний стан	формування базового стану територій
2022	початок повномасштабної війни	виявлення первинних екологічних змін
2023	накопичення воєнних впливів	аналіз розвитку деградаційних процесів
2024	період інтенсивних бойових дій	аналіз руйнувань, пожеж і втрати рослинності
2025	формування довготривалих наслідків	аналіз стійких екологічних змін
2026	актуальний стан	комплексне порівняння та картографування

Алгоритм, наведений на рис. 2, відображає повний цикл обробки даних дистанційного зондування Землі та геоінформаційного аналізу для оцінювання екологічних наслідків воєнних дій. На першому етапі формується інформаційна база дослідження, що включає багатоспектральні супутникові знімки Sentinel-2 MSI, радіолокаційні дані Sentinel-1 SAR, супутникові матеріали Landsat 8–9, інформацію NASA FIRMS про активні пожежі та відкриті геопросторові дані щодо адміністративних меж, транспортної інфраструктури, промислових об’єктів і бойових подій.

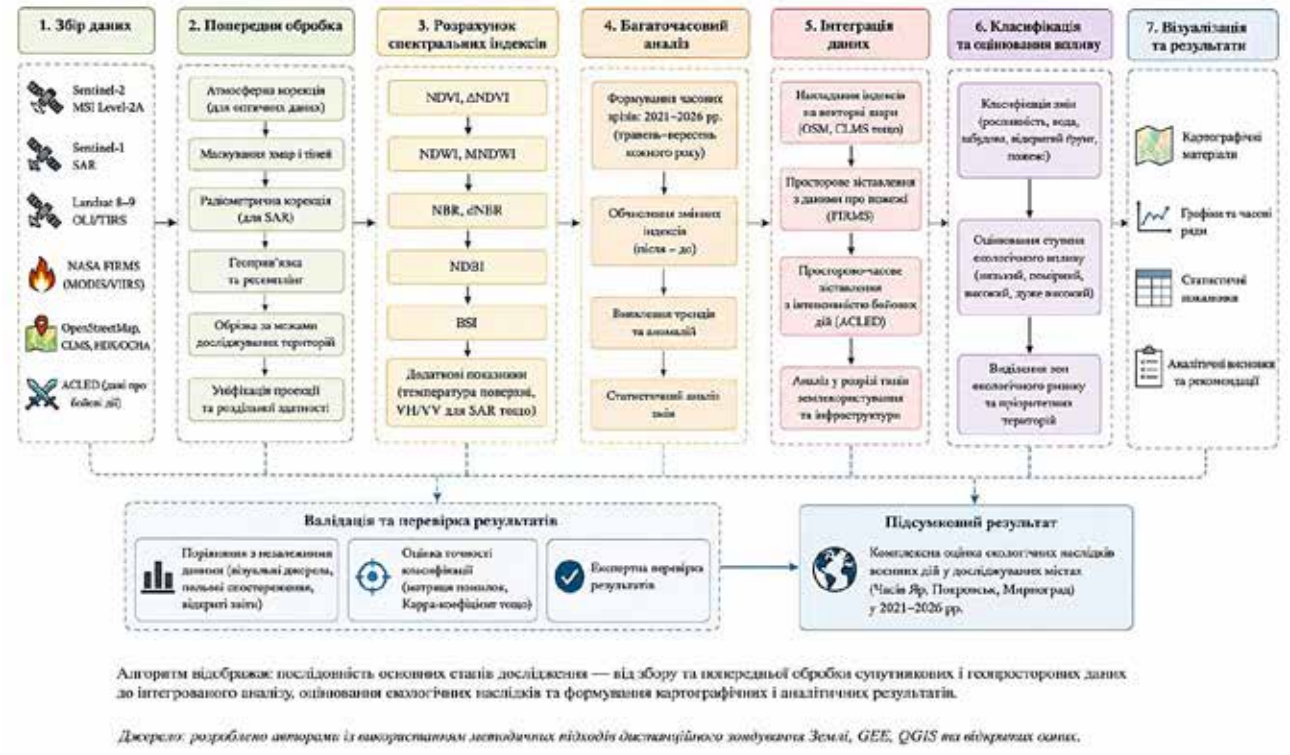
Другий етап передбачає попередню обробку даних, яка включає атмосферну та геометричну корекцію, маскування хмарності, приведення даних до єдиної проєкції, ресемплінг просторової роздільної здатності та обрізку растрових даних за межами досліджуваних територій. Це забезпечує коректність подальшого міжрічного порівняння супутникових знімків.

На третьому етапі здійснюється розрахунок спектральних індексів (NDVI, NDWI, MNDWI, NBR, dNBR, NDBI, BSI), що характеризують стан рослинного покриву, водних об’єктів, згарищ, забудованих територій і відкритих ґрунтів. Для багаточасового

Таблиця 3

Спектральні індекси, використані у дослідженні

Індекс	Формула	Характеристика	Основне призначення
NDVI	$\frac{NIR - R_{red}}{IR + R_{red}}$	рослинний покрив	аналіз стану та деградації рослинності
ΔNDVI	$NDVI_{після} - NDVI_{до}$	зміна рослинності	кількісна оцінка втрати рослинного покриву
NDWI	$\frac{Green - NIR}{Green + NIR}$	водні поверхні	виявлення водойм і зміни зволоження
MNDWI	$\frac{Green - SWIR}{Green + SWIR}$	урбанізовані водойми	уточнення меж водних об'єктів
NBR	$\frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$	згарища	виявлення пожеж
dNBR	$NBR_{після} - NBR_{до}$	ступінь пошкодження	оцінювання інтенсивності згарищ
NDBI	$\frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR}$	забудова	аналіз урбанізованих територій
BSI	$\frac{(SWIR + R_{red}) - (NIR + Blue)}{(SWIR + R_{red}) + (NIR + Blue)}$	відкритий ґрунт	виявлення порушених земель



Алгоритм відображає послідовність основних етапів дослідження — від збору та попередньої обробки супутникових і геопросторових даних до інтегрованого аналізу, оцінювання екологічних наслідків та формування картографічних і аналітичних результатів.

Джерело: розроблено авторами із використанням методичних підходів дистанційного зондування Землі, GEE, QGIS та відкритих даних.

Рис. 1. Алгоритм обробки супутникових та геопросторових даних для оцінювання екологічних наслідків воєнних дій

Джерело: розроблено авторами; візуалізацію виконано із використанням інструментів генеративного штучного інтелекту OpenAI ChatGPT, остаточне наукове структурування та редакційне опрацювання здійснено авторами

аналізу використовуються однакові сезонні часові зрізи за 2021–2026 рр., що дає змогу мінімізувати вплив сезонної мінливості природних компонентів.

Наступним етапом є інтеграція отриманих результатів із векторними геопросторовими даними та просторово-часове зіставлення спектральних змін із розташуванням промислових об’єктів, транспортної інфраструктури, шахт, водних об’єктів і райо-

нів ведення бойових дій. На основі комплексного аналізу виконується класифікація змін компонентів довкілля, визначаються території з найбільшою інтенсивністю екологічних порушень і формуються тематичні картографічні матеріали.

Заключним етапом алгоритму є валідація отриманих результатів шляхом їх порівняння з незалежними джерелами інформації, відкритими супутниковими матеріалами та результатами інших досліджень. Такий підхід підвищує достовірність інтерпретації просторово-часових змін і забезпечує формування науково обґрунтованої інформаційної основи для оцінювання екологічних наслідків воєнних дій та підтримки прийняття рішень щодо післявоєнного відновлення територій.

Концептуальну схему методики просторово-часового оцінювання екологічних наслідків воєнних дій наведено на рисунку 2.

Відповідність між використаними джерелами даних, розрахованими спектральними індексами та результатами просторового аналізу наведено в таблиці 4.

Комплексне використання багатоспектральних, радіолокаційних, термальних і векторних геопросторових даних забезпечує багаторівневий аналіз екологічних наслідків воєнних дій, підвищує достовірність інтерпретації результатів та дає змогу виявити просторові взаємозв'язки між руйнуванням інфраструктури, деградацією рослинності, трансформацією водних об'єктів, пожежами й техногенними ризиками.

Особливості досліджуваних територій. Об'єктами дослідження є міста **Покровськ, Мирноград і Часів Яр**, розташовані в Донецькій області. Вибір саме цих територій обумовлений поєднанням інтенсивного воєнного впливу та значного техногенного навантаження, характерного для вугільного регіону.

Часів Яр розглядається як репрезентативний приклад масштабного руйнування урбанізованого середовища, що підтверджується численними супутниковими спостереженнями та міжнародними картографічними матеріалами. **Покровськ** характеризується високою концентрацією транспортної, житлової та промислової інфраструктури, що робить його показовим для аналізу комплексного впливу бойових дій на міське середовище. **Мирноград** відзначається значним впливом вугільної промисло-

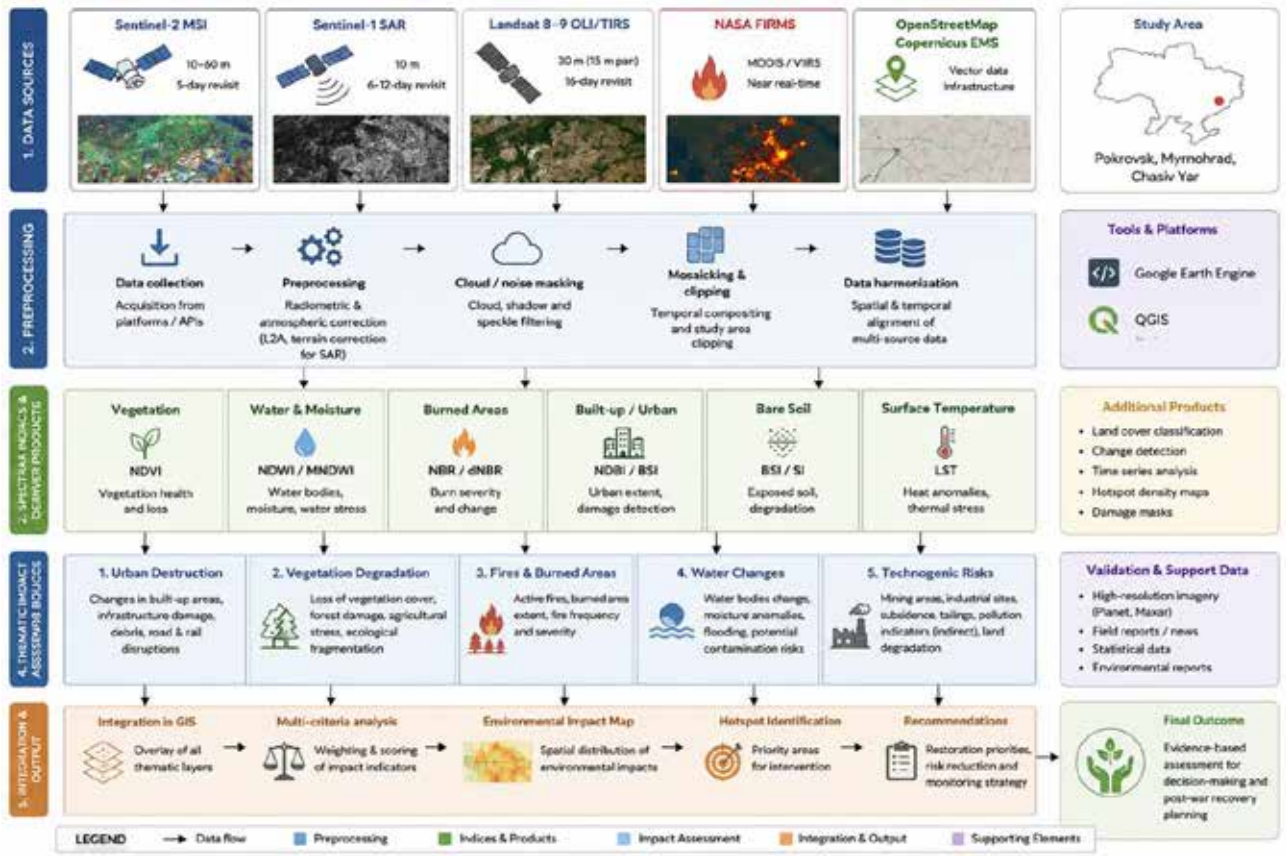


Рис. 2. Концептуальна схема методики оцінювання екологічних наслідків воєнних дій з а даними дистанційного зондування Землі

Джерело: розроблено авторами. Візуалізацію схеми виконано із використанням інструментів генеративного штучного інтелекту OpenAI ChatGPT; остаточне структурування, наукова інтерпретація та редакційне опрацювання здійснені авторами

Таблиця 4

Відповідність джерел даних, спектральних індексів та результатів просторового аналізу

Тематичний блок	Джерело даних	Спектральні індекси / показники	Аналітичний результат
Рослинний покрив	Sentinel-2 MSI	NDVI, ΔNDVI	Карти стану та деградації рослинності, визначення територій втрати зелених насаджень
Водні об'єкти	Sentinel-2 MSI	NDWI, MNDWI	Карти змін площі водойм, підтоплення або пересихання, аналіз водного стресу
Пожежі та згарища	Sentinel-2 MSI, NASA FIRMS	NBR, dNBR, термальні аномалії MODIS/VIIRS	Карти згарищ, локалізація осередків пожеж, оцінювання ступеня пошкодження територій
Урбанізовані території	Sentinel-2 MSI, Sentinel-1 SAR	NDBI, SAR-ознаки	Карти руйнування забудови, зміни міської структури та інфраструктури
Відкриті та порушені землі	Sentinel-2 MSI	BSI	Карти порушених земель, вирв, оголеного ґрунту та зон механічних пошкоджень
Техногенні об'єкти	OpenStreetMap, відкриті геодані	Просторове накладання (Overlay Analysis)	Локалізація шахт, териконів, промислових підприємств і зон потенційного екологічного ризику
Бойові дії	ACLED	Просторово-часове зіставлення	Встановлення взаємозв'язку між інтенсивністю бойових дій та змінами компонентів довкілля
Комплексне оцінювання	Усі використані джерела	Інтегральний геоінформаційний аналіз	Комплексні карти екологічних наслідків воєнних дій для міст Покровськ, Мирноград і Часів Яр

вості, тому особливу увагу приділено аналізу потенційних ризиків, пов'язаних із шахтними водами, підтопленням, деформаціями земної поверхні та техногенною трансформацією територій.

Запропонована методика забезпечує комплексне оцінювання екологічних наслідків воєнних дій шляхом інтеграції супутникових, геоінформаційних і тематичних просторових даних. Використання багаточасових супутникових спостережень та системи спектральних індексів створює підґрунтя для виявлення просторово-часових закономірностей деградації компонентів довкілля, визначення територій із найбільшим рівнем антропогенно-воєнного навантаження та формування картографічної основи для прийняття рішень щодо екологічного моніторингу й післявоєнного відновлення.

Результати дослідження. ***Концептуальні засади оцінювання екологічних наслідків.*** Дослідження екологічних наслідків воєнних дій із використанням даних дистанційного зондування Землі є одним із найбільш перспективних напрямів сучасного екологічного моніторингу. Використання багатоспектральних, радіолокаційних та термальних супутникових даних забезпечує можливість просторово-часового аналізу територій, доступ до яких обмежений або неможливий через активні бойові дії. Крім документування масштабів руйнувань, результати такого аналізу формують наукову основу для визначення пріоритетних територій післявоєнного обстеження, планування природоохоронних заходів та розроблення стратегій екологічного відновлення.

Оцінювання екологічних наслідків воєнних дій доцільно здійснювати не за єдиним інтегральним показником, а за системою взаємопов'язаних тематичних блоків, кожний із яких характеризує окремий компонент трансформації довкілля.

Перший блок охоплює **руйнування урбанізованого середовища**, що проявляється у зміні забудованих територій, пошкодженні промислових підприємств, транспортної інфраструктури, об'єктів енергетики та комунального господарства, появі зон завалів і порушенні просторової структури міського середовища. Для виявлення таких змін найбільш ефективним є поєднання багатоспектральних даних Sentinel-2 із радіолокаційними даними Sentinel-1, які забезпечують моніторинг незалежно від погодних умов та часу доби.

Другий блок характеризує **деградацію рослинного покриву**, що виникає внаслідок пожеж, вибухів, механічного порушення ґрунтів, облаштування фортифікаційних споруд, пересування важкої техніки та припинення господарського догляду за територіями. Для кількісного аналізу доцільно використовувати спектральні індекси рослинності (NDVI, EVI), які широко застосовуються для виявлення змін стану рослинного покриву за даними Sentinel-2.

Третій блок пов'язаний із **виявленням пожеж і згарищ**. Його основу становить аналіз індексів NBR та dNBR, що дають змогу визначати площі вигорілих територій, а також використання даних NASA FIRMS, сформованих на основі супутників MODIS і VIIRS, для реєстрації активних пожеж і термальних аномалій майже в реальному часі.

Четвертий блок стосується **змін водних об'єктів та водного стресу**. Для територій Покровська, Мирнограда та Часового Яру особливого значення набуває аналіз трансформації малих водойм, підтоплення територій, зміни вологості поверхні та потенційного впливу шахтних вод. Для цього можуть застосовуватися спектральні індекси NDWI, MNDWI та інші індикатори вологості у поєднанні з просторовим аналізом розташування шахт, водотоків і промислових майданчиків.

П'ятий блок характеризує **техногенні ризики**, пов'язані з функціонуванням вугільної промисловості. Незважаючи на те, що супутникові дані не забезпечують безпосереднього визначення хімічного складу ґрунтів чи вод, вони дають можливість виявляти непрямі ознаки техногенного впливу, зокрема зміну кольору водних об'єктів, локальні підтоплення, просідання земної поверхні, деградацію рослинності навколо промислових підприємств та інші просторові прояви порушення природних процесів.

Інформаційне забезпечення кожного тематичного блоку базується на комплексному використанні відкритих супутникових та геопросторових даних, характеристику яких наведено в таблиці 5.

Інформаційну основу дослідження формують відкриті супутникові дані різних типів, що взаємно доповнюють одне одного за спектральними та просторовими характеристиками. Багатоспектральні дані Sentinel-2 використовуються для аналізу рослинного покриву, водних об'єктів, згарищ і класифікації земного покриву. Радіолокаційні дані Sentinel-1 застосовуються для виявлення структурних змін забудови, просідання земної поверхні та інших трансформацій незалежно від хмарності. Архівні матеріали Landsat 8-9 забезпечують аналіз довгострокових змін земного покриву та температурних аномалій. Дані NASA FIRMS використовуються для реєстрації активних пожеж і термальних аномалій, а інформаційні ресурси OpenStreetMap і Copernicus Emergency Management Service – для просторового зіставлення пошкоджень із транспортною мережею, забудовою та іншими елементами інфраструктури.

Особливе значення для дослідження мають дані Sentinel-2 MultiSpectral Instrument (MSI), що містять 13 спектральних каналів із просторовим розрізненням 10, 20 та 60 м. Використання гармонізованої колекції Sentinel-2 Level-2A Surface Reflectance у середовищі Google Earth Engine забезпечує доступ до однорідних багаторічних часових рядів із періодичністю повторного знімання близько п'яти діб, що створює передумови для проведення просторово-часового аналізу екологічних змін.

Запропонована методика передбачає послідовне опрацювання багатоджерельних супутникових даних, розрахунок спектральних індексів, просторовий аналіз тематичних показників та інтеграцію отриманих результатів у єдину систему оцінювання екологічних наслідків воєнних дій. Такий підхід забезпечує комплексний аналіз трансформації природного й антропогенного середовища та формує інформаційну основу для визначення пріоритетних територій післявоєнного відновлення.

Висновки. У статті узагальнено сучасні підходи до оцінювання екологічних наслідків воєнних дій із використанням даних дистанційного зондування Землі та геоінформаційних технологій і обґрунтовано доцільність їх застосування для дослідження територій міст Покровськ, Мирноград і Часів Яр.

Сформовано комплексну інформаційну базу дослідження, яка інтегрує багатоспектральні дані Sentinel-2 MSI, радіолокаційні матеріали Sentinel-1 SAR, супутникові знімки Landsat 8–9, інформацію NASA FIRMS про активні пожежі, відкриті геопросторові дані та відомості про бойові події. Запропоноване поєднання різнорідних джерел забезпечує комплексний аналіз просторово-часових змін компонентів довкілля.

Обґрунтовано систему спектральних індексів (NDVI, ΔNDVI, NDWI, MNDWI, NBR, dNBR, NDBI

Таблиця 5

Характеристика супутникових та геопросторових даних, використаних для оцінювання екологічних наслідків воєнних дій

Джерело даних	Основне призначення
Sentinel-2 MSI	Аналіз рослинного покриву, водних об'єктів, згарищ, відкритих ґрунтів і класифікація земного покриву
Sentinel-1 SAR	Виявлення руйнувань, змін шорсткості поверхні, просідань та трансформації міської структури незалежно від хмарності
Landsat 8–9	Аналіз довгострокових змін земного покриву та температурних аномалій
NASA FIRMS	Моніторинг активних пожеж і термальних аномалій за даними MODIS та VIIRS
OpenStreetMap / Copernicus EMS	Просторове зіставлення пошкоджень із дорожньою мережею, забудовою та елементами інфраструктури

та BSI), яка охоплює основні компоненти природного й антропогенного середовища та створює основу для виявлення деградації рослинного покриву, трансформації водних об'єктів, згарищ, змін забудованих територій і порушених земель.

Розроблено методику просторово-часового аналізу, що поєднує попередню обробку супутникових даних, розрахунок спектральних індексів, інтеграцію растрової та векторної інформації, просторове зіставлення з техногенними об'єктами й районами бойових дій, а також картографічне узагальнення результатів. Запропонований алгоритм забезпечує відтворюваність дослідження та може бути адаптований для інших територій, що зазнали воєнного впливу.

Наукова новизна дослідження полягає у розробленні комплексного підходу до оцінювання екологічних наслідків воєнних дій на промислових територіях шляхом інтегрованого використання багатоспектральних, радіолокаційних і термальних супутникових даних у поєднанні із системою спектральних індексів та геоінформаційним аналізом. На відміну від більшості існуючих підходів, запропонована методика враховує одночасно природні, урбанізовані та техногенно трансформовані компоненти довкілля.

Практичне значення запропонованої методики – у формуванні науково обґрунтованої інформаційної основи для екологічного моніторингу територій, визначення пріоритетних ділянок для польових обстежень, підтримки прийняття управлінських рішень щодо післявоєнного відновлення та створення геопросторової доказової бази для оцінювання екологічних наслідків воєнних дій.

Література

1. United Nations Environment Programme. The Environmental Impact of the Conflict in Ukraine: A Preliminary Review Nairobi : UNEP, 2022. 54 p. URL: https://www.unep.org/resources/report/environmental-impact-conflict-ukraine-preliminary-review (дата звернення: 08.07.2026).
2. Conflict and Environment Observatory (CEOBS). Ukraine URL: https://ceobs.org/countries/ukraine/ (дата звернення: 08.07.2026).
3. Conflict and Environment Observatory (CEOBS), Zoï Environment Network. Assessing Environmental Damage in Ukraine 2024. URL: https://ceobs.org/paper-assessing-environmental-damage-in-ukraine/ (дата звернення: 08.07.2026).
4. Hryhorczuk D., Levy B. S., Prodanchuk M., Kravchuk O., Bubalo N., Hryhorczuk A., Erickson T. B. The environmental health impacts of Russia's war on Ukraine. Journal of Occupational Medicine and Toxicology. 2024. Vol. 19. Art. 1. DOI: https://doi.org/10.1186/s12995-023-00398-y.
5. Conflict and Environment Observatory (CEOBS), Zoï Environment Network. The Environmental Consequences of the War against Ukraine: Preliminary Twelve-Month Assessment (February 2022 – February 2023). Summary and Recommendations 2024. URL: https://ceobs.org/the-environmental-consequences-of-the-war-against-ukraine-preliminary-12-month-assessment-summary-and-recommendations/ (дата звернення: 08.07.2026).
6. Copernicus Emergency Management Service. Emergency Management Service : Service Overview European Union, 2025. URL: https://mapping.emergency.copernicus.eu/documents/40/CopernicusEMS-Service_Overview_Brochure.pdf (дата звернення: 08.07.2026).
7. Deininger K., Ayalew Ali D., Kussul N., Shelestov A., Shumilo L., Lemoine G. Using free remotely sensed data to assess war-induced damage to agricultural cultivation: Evidence from Ukraine. Journal of Development Economics. 2026. Vol. 179. Art. 103661. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2025.103661.
8. Герасимчук Л. О. Військові дії як чинник утворення відходів. Таврійський науковий вісник. 2023. № 133. С. 305–312. DOI: https://doi.org/10.32782/2226-0099.2023.133.41.
9. Кононенко В. П., Новікова Л. В. Вплив регіональних збройних конфліктів на міжнародну екологічну безпеку. Альманах міжнародного права. 2020. № 24. С. 214–221. DOI: https://doi.org/10.32841/ILA.2020.24.25.
10. Кучер В. О., Євхутич І. М., Парасюк В. М. Забезпечення екологічної безпеки на території окупованого Донбасу. Юридичний науковий електронний журнал. 2021. № 9. С. 115–118. DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0374/2021-9/27.
11. Кучер А. В. Методика оцінювання збитків, завданих збройною агресією земельному фонду та ґрунтам: проблеми та напрями вдосконалення. Journal of Innovations and Sustainability. 2022. Т. 6, № 2. Ст. 10. DOI: https://doi.org/10.51599/is.2022.06.02.10.
12. Трегуб О. А. Правове забезпечення екологічного відновлення міст на постконфліктних територіях. Вісник Луганського державного університету внутрішніх справ імені Е. О. Дідоренка. 2020. № 4 (92). С. 273–285. DOI: https://doi.org/10.33766/2524-0323.92.273-285.
13. Балюк С. А., Кучер А. В., Солоха М. О., Соловей В. Б. Оцінювання впливу збройної агресії РФ на ґрунтовий покрив України. Український географічний журнал. 2024. № 1 (125). С. 7–18. DOI: https://doi.org/10.15407/UGZ2024.01.007
14. Нікітченко І. В., Прокопенко Н. Ю., Шведчикова І. О. Вплив військових конфліктів на навколишнє середовище та екологію Луганськ : Східноукраїнський національний університет імені В. Даля, 2015. С. 253–255. URL: https://core.ac.uk/download/pdf/84593128.pdf (дата звернення: 08.07.2026).
15. Цимбалюк К. В. Вплив військового конфлікту на екологічний стан водних ресурсів України. Екологічна безпека держави : матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів. 2024. Вип. 18. С. 10. DOI: https://doi.org/10.18372/2786-8168.18.18537.

Дата першого надходження статті до видання: 01.09.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

ЕКОЛОГІЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ

УДК 502.175:502.3
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.15

СМАРТ-СИСТЕМА ЕКОЛОГО-РАДІАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ

Григор'єв К.В. (orcid.org/0000-0003-2804-2758),
Алексєєва А.О. (orcid.org/0000-0003-0345-8538),
Григор'єва Л.І. (orcid.org/0000-0001-9452-2982)
Чорноморський національний університет імені Петра Могили
вул. 68 Десантників, 10, 54003, м. Миколаїв
ludmila.grygorieva@chmnu.edu.ua

У статті представлено результати виявлення особливостей формування забруднення атмосферного повітря агломерацій хімічними та радіонуклідними полютантами від стаціонарних, пересувних джерел та джерел радіаційного ризику під час воєнного стану. Дослідження виконувалися в урбоекосистемі Миколаївської міської агломерації. Обгрунтовано комплексний підхід до системи еколого-радіаційного моніторингу атмосферного повітря агломерацій з урахуванням екологічних (вміст хімічних полютантів) та радіаційних (ефективна доза опромінення) обмежень; застосування підходу дозволить повноцінно оцінювати стан атмосферного повітря та екологічні загрози під впливом стаціонарних, пересувних джерел та радіаційних ризиків під час воєнного стану. Визначено значущість впливу викидів полютантів транзитним вантажним автотранспортом, обгрунтувано обмеженість результативності радіаційного моніторингу при спостереженнях лише за потужністю ефективної дози. Представлено рекомендації щодо розширеного використання у системі державного моніторингу станцій індикативних вимірювань формальдегіду при умові іхнього калібрування за результатами вимірів на стаціонарних постах.

Представлено принципову схему створення смарт-системи екологічного моніторингу у населених пунктах, мешканці яких відчувають на собі вплив викидів стаціонарними джерелами, автотранспорту, в першу чергу, від транзитного багатотонажного транспорту, а також знаходяться в зоні ризику впливу радіонуклідних викидів. Це надасть можливість громадам і місцевому самоврядуванню громад, виробляти політику обмеження впливу інтенсивних транспортних потоків на населення та/або відшкодовувати завдану шкоду; оперативно реагувати на зміни раліонуклідного складу повітря. В результаті буде вирішуватися питання стійкості громади до небезпечних полютантів атмосферного повітря, в т.ч. під час екологічної загрози, спричиненої воєнними діями. *Ключові слова:* атмосферне повітря, моніторинг, екологічна безпека, радіонуклідні та хімічні полютанти, воєнні дії, екологічна і радіаційна загроза, потужність ефективної дози, забруднення повітря, пил, прогнозування, якість повітря.

Smart system for environmental and radiation monitoring of atmospheric air. Grygoriev K., Aleksieieva A., Grygorieva L.

This article presents the results of a study identifying the patterns of atmospheric air pollution in urban agglomerations caused by chemical and radionuclide pollutants from stationary and mobile sources, as well as sources of radiation risk, during martial law. The research was conducted in the urban ecosystem of the Mykolaiv metropolitan area. A comprehensive approach to the system of environmental and radiation monitoring of atmospheric air in urban areas has been justified, taking into account environmental (chemical pollutant content) and radiation (effective radiation dose) constraints. The application of this approach will allow for a comprehensive assessment of atmospheric air quality and environmental threats caused by stationary and mobile sources, as well as radiation risks during martial law. The significance of the impact of pollutant emissions from transit freight vehicles was determined, and the limited effectiveness of radiation monitoring when observations are based solely on effective dose rate was substantiated. Recommendations are presented regarding the expanded use of indicative formaldehyde measurement stations in the state monitoring system, provided they are calibrated based on measurements taken at fixed monitoring stations.

A conceptual framework is presented for creating a smart environmental monitoring system in populated areas whose residents are exposed to emissions from stationary sources and motor vehicles–primarily from heavy-duty transit vehicles–and who are also at risk of exposure to radionuclide emissions. This will enable communities and local governments to develop policies to limit the impact of heavy traffic on the population and/or compensate for the damage caused, as well as to respond promptly to changes in the radionuclide composition of the air. As a result, the issue of community resilience to hazardous air pollutants will be addressed, including during environmental threats caused by military operations. *Key words*: atmospheric air, monitoring, environmental safety, radionuclides and chemical pollutants, military operations, environmental and radiation threats, effective dose rate, air pollution, dust, forecasting, air quality.

© Григор'єв К.В., Алексєєва А.О., Григор'єва Л.І., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. Ефективне й оперативне оцінювання стану атмосферного повітря давно складає одну з актуальних урбоекологічних проблем та одну з задач екологічного моніторингу. Ще до воєнних подій останніх років у промислових міських агломераціях України, через нарощування обсягів викидів, був порушений природний механізм самоочищення атмосфери, що призводило до глобальних змін. Повномасштабне російське вторгнення на територію України суттєво вплинуло на забруднення атмосферного повітря: з'явилися нові джерела викидів забруднюючих речовин, актуалізувалися питання радіаційного забруднення повітря.

При цьому воєнні дії не припинили рух України щодо впровадження регіональних програм стійкого розвитку громад і територій в межах одного з принципів сталого розвитку. Саме для підвищення стійкості міст і населених пунктів, які зазнають впливу від стаціонарних, пересувних джерел викидів атмосферних полютантів, та в яких у воєнні часи підвищується ймовірність викидів радіонуклідних полютантів з АЕС, постає питання підвищення рівня еколого-радіаційної безпеки атмосферного повітря агломерацій шляхом розширення результативності та інформативності системи його моніторингу.

Актуальність дослідження. Система екологічного моніторингу атмосферного повітря агломерацій у нашій державі потребує реконструкції і вдосконалення [1, 2, 9-11], щоб поєднати національні та світові підходи [6]. Російсько-українська війна актуалізувала питання вдосконалення також радіаційного моніторингу атмосферного повітря задля підвищення ефективності при оцінюванні радіаційно-екологічної ситуації. За час агресії рф проти України через постійні обстріли територій ракетами та безпілотними апаратами підвищилася увага до радіаційної безпеки на території України [2, 3, 7]. Науковці актуалізують питання транскордонного перенесення радіаційного впливу при ймовірніснних надзвичайних ситуаціях на АЕС, а також під час воєнних дій [3, 4]. Питання ефективності радіаційного моніторингу атмосферного повітря складають одну із цілей сталого розвитку – підвищення безпеки, життєстійкості й екологічної стійкості міст і населених пунктів.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження виконувалися відповідно до наукових напрямів кафедри екології ЧНУ імені Петра Могили.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За час агресії рф проти України через постійні обстріли територій ракетами та безпілотними апаратами підвищилася увага до радіаційної безпеки на території України [2, 3, 7], і, особливо, поблизу АЕС. Науковці актуалізують питання транскордонного перенесення радіаційного впливу при ймовірнісних надзвичайних ситуаціях на АЕС, а також під час воєнних дій [4, 7]. Тому важливим є підвищення інформативності та результативності еколого-радіаційного моніторингу атмосферного повітря.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Стаття присвячена представленню смарт-системи еколого-радіаційного моніторингу атмосферного повітря агломерацій, які зазнають комплексного впливу викидів полютантів від стаціонарних, пересувних джерела викидів хімічних полютантів, а у воєнні часи підвищується ймовірність викидів радіонуклідних полютантів з розташованих поблизу атомних електростанцій.

Методологічне або загальнонаукове значення. У роботі представлено результати комплексного підходу до оцінювання стану атмосферного повітря у міській агломерації (на прикладі м. Миколаєва) за хімічними та радіонуклідними полютантами. Вибір цієї агломерації обґрунтований її географічним положенням і існуванням, через останнє, інтенсивних автотранспортних потоків не лише громадського автотранспорту, а й вантажного (зернова логістика, інші види логістики до морських портів). В основі розрахунку валових викидів автотранспортом лежить відома затверджена методика [5]. Вихідними даними виступали дані про кількість та вид автотранспорту та фактичний об'єм спожитого палива. Ці дані нами, для громадського автотранспорту, взято з офіційних джерел відповідних комунальних підприємств «Миколаївпастранс». Для обліку вантажного транзитного автотранспорту ми використали два методи. Перший (натурного дослідження): проведено підрахунки вантажівок на трьох основних автотрасах: Н-24 (Благовіщенське – Миколаїв), Н-11 (Дніпро – Кривий Ріг – Миколаїв), Н-14 (Олександрівка – Кропивницький – Миколаїв). Другий метод: взято у розрахунок об'єм вантажу зерна, який перевалено у морському порту – це 15 млн. тон у 2021 р., та враховуючи середню вантажопідйомність зерновоза у 25-30 тон. За обома методами отримано величину, в середньому, 1000 вантажівок на добу, що й було взято у подальші розрахунки. Дослідження за вмістом полютантів в атмосферному повітрі базувалися на поєднанні результатів наземних спостережень на постах державної системи моніторингу за 2015-2025 рр. з результатами власних досліджень за допомогою станцій індикативних вимірювань. На постах державної системи моніторингу – це точки 1 – 4 на рисунку 1, місця розміщення станцій індикативних вимірювань – це точки 5 – 8 на рисунку 1. Експериментальні вимірювання потужності дози гамма-випромінювання виконувалися за допомогою дозиметра МКС-05 ТЕРРА, дозиметра-спектрометра Radiocode-103. Вимірювання здійснювалися на рівні не нижче 1 м від поверхні землі, два-три рази на тиждень, у т.5, т.6.

Для врахування відмінностей між системами екологічного моніторингу у країнах ЄС та в Україні в дисертаційному дослідженні приділено увагу спостереженням пилового забруднення як в загальній

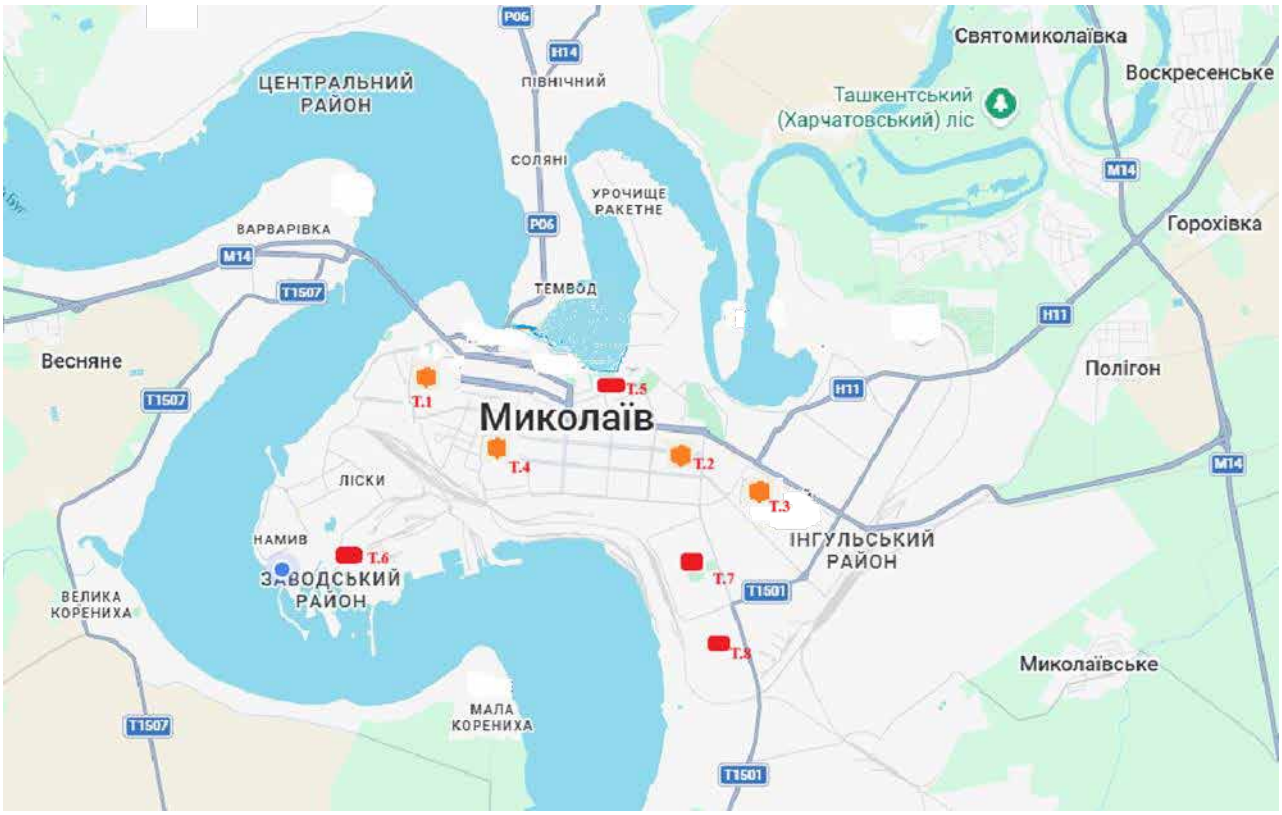


Рис. 1. Схема точок спостереження: 1) на стаціонарних постах державної системи моніторингу: т.1 – вул. Обсерваторна, 1, т.2 – вул.Погранична – пр. Богоявленський, т.3 – вул.7-а Повздовжня, 12 (промислова зона), т.4 – площа Суднобудівників; 2) на постах станцій індикативних вимірювань: т.5 – вул. 68 Десантників, 10; т.6 – вул. Лазурна, 5; т.7 – пр. Центральний, 28; т.8 – вул. Космонавтів, 5

фракції, так і в дрібнодисперсних фракціях (PM2,5; PM10). Через те, що в Україні у міських агломераціях високим є рівень вмісту у повітрі формальдегіду, приділено увагу дослідженню вмісту формальдегіду у повітрі урбанізованих центрів міських агломерацій.

У роботі представлено отримані методологічні прийоми, які дозволяють розширити інформативність існуючого моніторингу стану атмосферного повітря: 1) за умови калібрування станцій індикативних вимірювань за результатами вимірів на стаціонарних постах можливе широке їх використання для моніторингу вмісту формальдегіду у місцях скупчення автотранспорту; 2) використання визначеного значення потужності ефективної дози, яке корелює з граничним вмістом йоду-131 у повітря дозволяє прискорити прийняття рішень щодо початку відбору й радіометрії проб атмосферного повітря у випадку загострення радіаційної ситуації.

Основний матеріал дослідження.

Аналіз даних Головного управління статистики у Миколаївській області щодо викидів атмосферних полютантів стаціонарними джерелами у 2023-24 рр. [8] свідчив, що основні об'єми викидів атмосферних полютантів зі стаціонарних джерел приходяться на підприємства газотранспортної системи та на комунальні підприємства теплоенергетики: у м. Миколаєві це «Миколаївоблтеплоенерго». Валовий викид хімічних полютантів стаціонарними джерелами викиду за даними 2024 р. у Миколаївській агломерації склав 1432 тон. У загальному обсязі викидів атмосферних полютантів стаціонарними джерелами викиди пилу складали 29-45%, оксиду вуглецю 35-41%, діоксиду азоту 14-25%. З 2022 р. об'єм викидів знизився більше, ніж у два рази, у м. Миколаєві зниження відбулося з 3 до 1 тон.

На рисунку 1 відображено результати розрахунку викидів атмосферних полютантів від різних джерел: стаціонарних і пересувних: громадського та транзитного транспорту. За результатами розрахунку валового викиду хімічних полютантів від транзитного вантажного транспорту у м. Миколаєві маємо, що у м. Миколаєві додатковий викид атмосферних полютантів становив від 16 до 48% для різних полютантів. Додатковий викид летких органічних речовин (формальдегіду) становив 28% (рис. 2).

Спостереження за вмістом полютантів в атмосферному повітрі дозволив визначити розмах варіювання концентрацій твердих частинок пилу PM2,5, який становив від 3 до 13 мкг/м^3, а часточок PM10 – від 12 до 40 мкг/м^3. Визначено наявність перевищення гранично-допустимої середньодобової

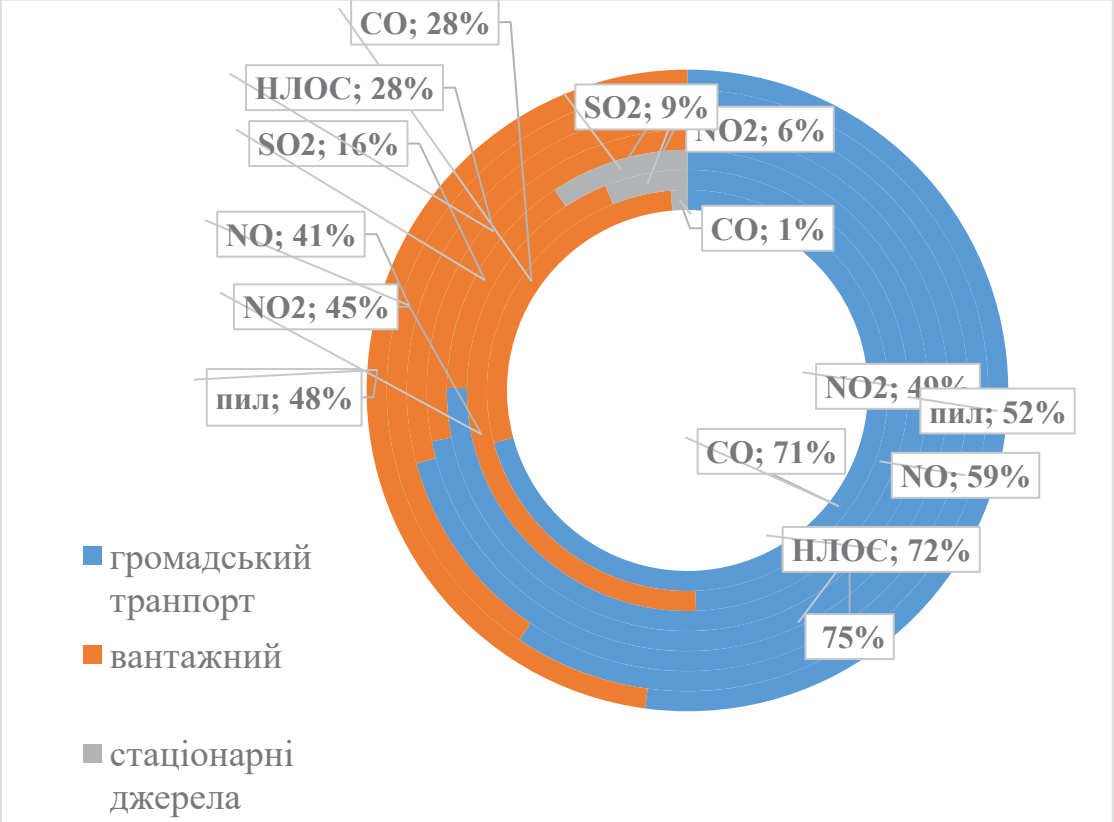


Рис. 2. Кругові діаграми об'ємів викидів полютантів (CO, NO_2, $S0_2$) громадським транспортом, вантажним транспортом та стаціонарними джерелами викидів у м. Миколаєві

концентрації максимальними величинами. Ці максимальні величини стійко фіксувалися у двох точках – точках інтенсивного руху вантажного транспорту: т.2 – вул. Погранична – пр. Богоявленський; т.3 – вул. 12 Лінія – 7-а Повздовжня (промислова зона). Визначено, що середньомісячний рівень формальдегіду в атмосферному просторі м. Миколаєва у період 2015-2025 рр. коливався у межах 0,021–0,081 мг/м^3. Спостереження на станціях індикативних вимірюваннях у довоєнні роки дозволили простежити чітку тенденцію до зростання рівнів формальдегіду у літньо-осінні місяці – періоду інтенсивних потоків транзитного вантажного транспорту (рис. 3).

Для Миколаївської міської агломерації показано, що у повітряному просторі наявне хронічне перевищення гранично-допустимих концентрацій небезпечних полютантів: формальдегід, фтористий водень, двоокис азоту, вуглекислий газ, бензапірен, пил. Особлива велика кратність перевищення нормативів характерна для формальдегіду, основним чинником чого виступає автотранспорт. У воєнні роки забруднення атмосферного повітря, пов'язаного з викидами вантажним автотранспортом, також було високим, адже через місто курсували воєнні машини. При таких масштабах курсуючих вантажівок кількість полютантів, які викидаються у повітря на рік на кожні 10 км транзиту, складає: за чадним газом – більше 17,5 тон; за двоокисом азоту – близько 2 тон; за неметановими леткими органічними сполуками (в т.ч. формальдегід) – біля 5 тон. Транзитні траси проходять безпосередньо через населені пункти (міста: Нова Одеса, Вознесенськ, Південноукраїнськ, Первомайськ, Баштанка, Новий Буг, Казанка тощо та ряд селищних населених пунктів), які не забезпечені, як в європейських країнах, захисними бар'єрами. В результаті атмосферні полютанти насичують повітря та потрапляють до легенів мешканців, осідають на сільськогосподарських землях тощо. Через те, що для станцій індикативних вимірювань характерно відсутність точності результатів, проведено паралельні одночасні вимірювання вмісту формальдегіду на станціях індикативних вимірювань та на стаціонарних постах 2, 4 державної системи моніторингу у м. Миколаєві у листопаді – січні 2021 р. Результати відображено на рисунку 4. Порівняльним методом з фіксованими вимірюваннями визначено поправочний коефіцієнт (0,66) для однієї станції індикативних вимірювань Oxygen Air Fresh Max. Це дозволило внести рекомендацію щодо можливості широкомасштабного використання цих станцій у державній системі моніторингу, після калібрування їх за фіксованими вимірюваннями.

Установлено, що у період воєнних дій у 2022-24 рр. потужність ефективної дози атмосферного повітря

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

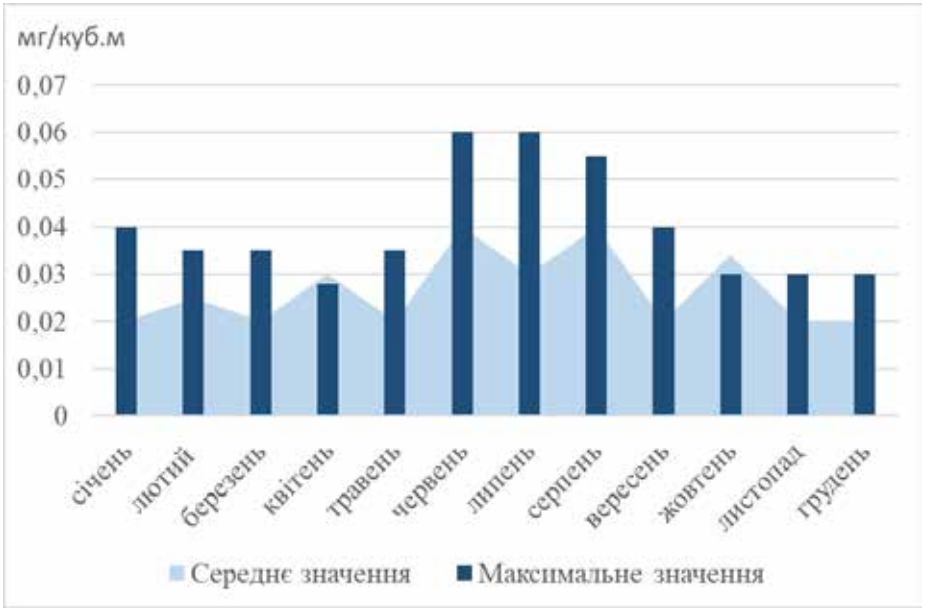


Рис. 3. Середньомісячна (типова) динаміка вмісту CH20 за результатами вимірювань на станціях індикативних вимірювань Oxygen Air Fresh Max, Save Eco Sensor у точці 5 рисунку 1

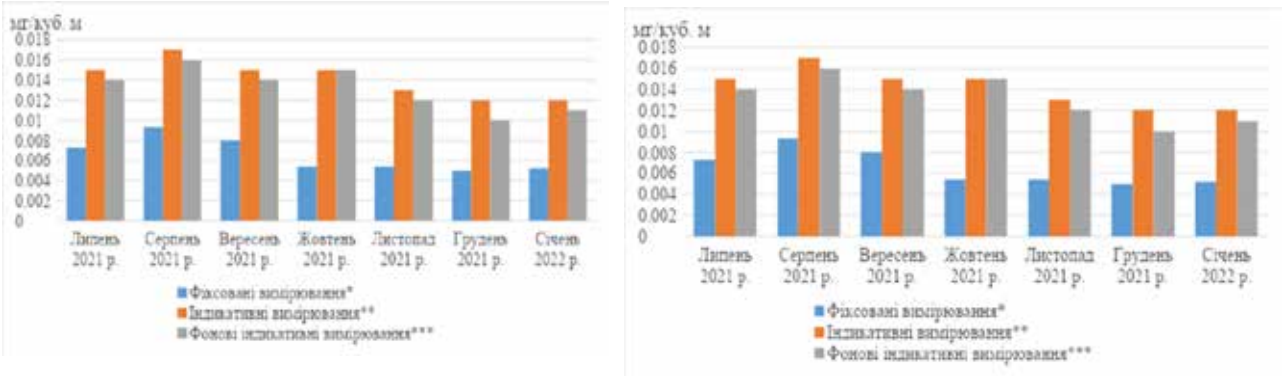


Рис. 4. Порівняння середніх (А) та максимальних значень (Б) між фіксованими (лабораторія Гідрометцентру) вимірюваннями та індикативними вимірюваннями (станції станціями Oxygen Air Fresh) вмісту формальдегіду в атмосферному повітрі м. Миколаєва за липень 2021 р. – січень 2022 р.

у м. Миколаєві складала рівні 0,12 мкЗв/год, тобто не виходила за межі коливань природного радіаційного фону. З метою розширення можливостей системи радіаційного моніторингу атмосферного повітря проаналізовано архівні матеріали радіоекологічних досліджень у м. Миколаєві у квітні-травні 1986 р. За цими матеріали визначено кореляційну залежність між вмістом йоду-131 у повітрі та величиною потужності ефективної дози. Визначено, що гранично-допустима концентрація радіойоду у повітрі (7,3 Бк/куб.м) досягається при ефективній дозі у повітрі 2,5мкЗв/год (рис. 5). Це дозволило нам внести пропозицію, щоб вимірювання потужності ефективної дози доповнити індикацією контрольного рівня 2,5 мкзВ/год – починаючи з якого потрібно розпочинати аспіраційний відбір проб повітря, адже йод-131 одним з перших викидається при аварії на АЕС.

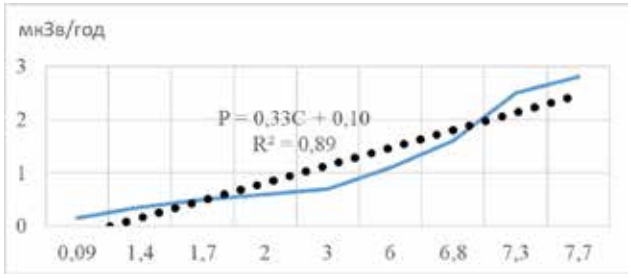


Рис. 5. Взаємозв'язок між вмістом ^{131}I у повітрі м. Миколаєва та рівнем потужності ефективної дози

Ці отримані результати дозволили нам зробити висновок, що існує комплексна проблема щодо екологічної безпеки атмосферного повітря таких агломерацій і представити Smart-систему моніто-

рингу атмосферного повітря, яка дозволяє в постійному он-лайн режимі здійснювати спостереження за: 1) вмістом дрібнодисперсних частинок PM10 і PM2,5, формальдегіду, за потужністю ефективної дози (для окремих населених пунктів), 2) підвищити екологічну стійкість агломерацій та приймати місцевою громадою обгрунтовані рішення для захисту атмосферного повітря.

Smart-система представляє собою розміщення станцій індикативних вимірювань (станцій Save-Dnipro, станцій Eco-city тощо) у кожному населеному пункті (перед в'їздом та після) з під'єднанням станцій до онлайн-платформ SaveEcoBot, EcoCity, IQAir.

Для створення Smart-системи (рис. 6):

1. станції індикативних вимірювань формальдегіду калібруються відповідно до лабораторних вимірів вмісту CH_20 у повітрі,

2. станції індикативних вимірювань потужності ефективної дози калібруються відповідно до гранично-допустимого рівня ^{131}I у повітрі відкритої місцевості;

3. станції індикативних вимірювань розміщуються перед в'їздом у населений пункт та у населеному пункті в районі світлофора (де найбільший викид у повітря атмосферних полютантів);

4. для оперативного реагування на радіаційну загрозу: можливе під'єднання до станцій пробовідбірників атмосферного повітря з автоматичним включенням при перевищенні граничного значення потужності ефективної дози, можливе розміщення пробовідбірників опадів з атмосфери;

5. у територіальних громадах фокусується центр спостережень, доступ до електронних карт, а також можливе додаткове розташування відбору проб опадів з атмосфери та пробовідбірника опадів з атмосфери.

Розгортання у населених пунктах, які розташовані вздовж транспортних магістралей Миколаївщини, станцій Smart-системи дозволятиме кожному мешканцю:

1) в постійному онлайн режимі (на смартфонах, компьютерах) отримувати інформацію про рівні діоксиду азоту, чадного газу, формальдегіду, дрібнодисперсних частинок PM10 і PM2,5, потужності ефективної дози (в окремих пунктах) в атмосферному повітрі населених пунктів;

2) спостерігати про стан атмосферного повітря в населеному пункті на світовій карті моніторингу атмосферного повітря (типу eco-city.org.ua);

3) спостерігати за рівнем потужності ефективної дози опромінення;

Це надасть можливість громадам і місцевому самоврядуванню населених пунктів, через які проходять інтенсивні транспортні потоки, виробляти політику обмеження впливу цих потоків на населення та/або відшкожування завданої шкоди (наприклад, через введення екологічного податку на проїзд тощо). В умовах воєнної загрози викиду радіонуклідіних полютантів з АЕС це дозволятиме швидко орієнтуватися у радіонуклідному складі атмосферного повітря та в оперативному введенні відповідних превентивних заходів.

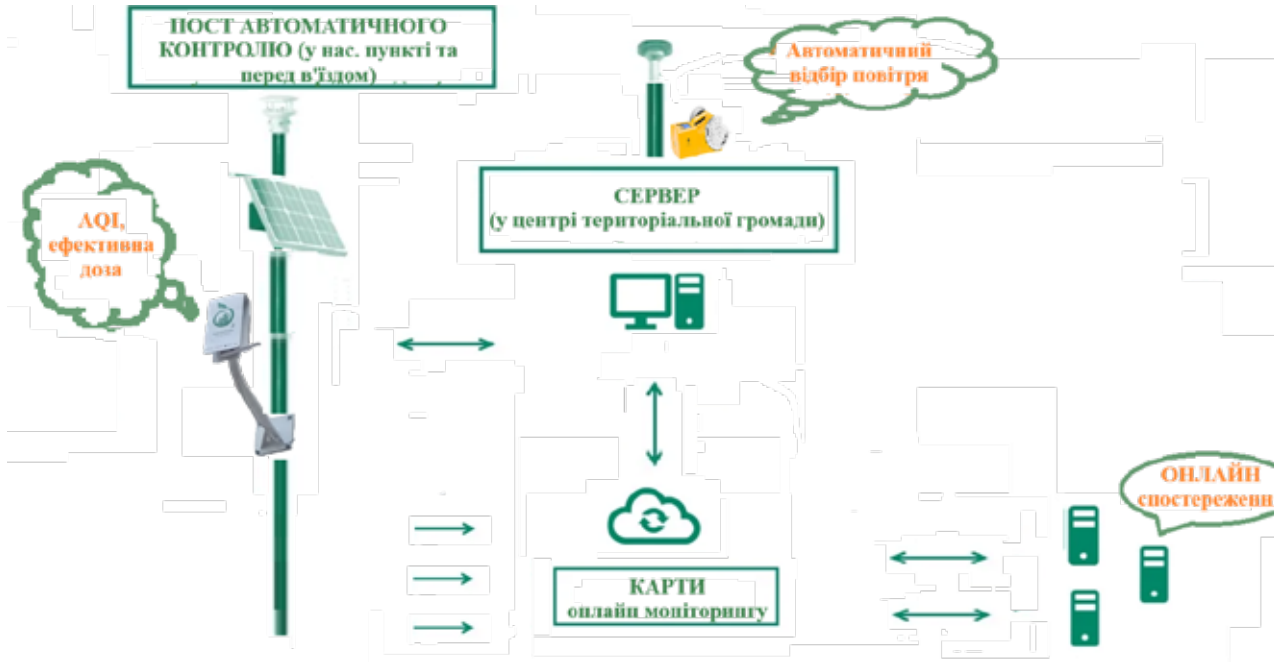


Рис. 6. Принципова схема Smart-системи еколого-радіаційного моніторингу атмосферного повітря у населених пунктах агломерацій, які зазнають комплексного впливу вантажного автотранспортного потоку та перебувають у зоні радіаційного ризику

ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

В результаті буде вирішуватися питання стійкості громади до небезпечних полютантів оточуючого середовища, в т.ч. під час воєнної екологічної загрози.

Висновки і перспективи подальших досліджень.

1. Обгрунтовано комплексний підхід до системи еколого-радіаційного моніторингу атмосферного повітря агломерацій з урахуванням екологічних (вміст хімічних полютантів) та радіаційних (ефективна доза опромінення) обмежень; застосування підходу дозволить повноцінно оцінювати стан атмосферного повітря та екологічні загрози під впливом стаціонарних, пересувних джерел та радіаційних ризиків під час воєнного стану.

2. Розширено уявлення про формування забруднення атмосферного повітря полютантами у міських агломераціях під впливом викидів полютантів стаціонарними джерелами та пересувними джерелами транзитних вантажних транспортних потоків.

3. Представлено принципову схему створення смарт-системи екологічного моніторингу у населених пунктах, мешканці яких відчувають на собі вплив викидів стаціонарними джерелами, автотранспорту, в першу чергу, від транзитного багатотонажного транс-порту, а також знаходяться в зоні ризику впливу радіонуклідних викидів. Ця система базується на: 1) використанні станцій індикативних вимірювань, для яких визначено поправочний коефіцієнт для формальдегіду (CH_20), 2) використанні граничного значення потужності ефективної дози для початку аспіраційного відбору проб повітря при аварійному викиді радіонуклідів, 3) розміщенні пристроїв відбору проб повітря та опадів з атмосфери, 4) використанні відомих онлайн-платформ екологічного моніторингу. Система дозволить вирішувати питання стійкості громади до небезпечних полютантів атмосферного повітря, в т.ч. під час екологічної загрози, спричиненої воєнними діями.

Перспективи використання результатів дослідження.

Результати досліджень будуть апробовані та верифіковані на рівні інших агломерацій. Результати досліджень використовуються в органах місцевого самоврядування Миколаївської міської ради.

Література

1. Бахарєв В. С. Комплексна система екологічного моніторингу атмосферного повітря урбосистем : дис. … д-ра техн. наук : 21.06.01 / Кременчуцький нац. ун-т ім. М. Остроградського. Кременчук, 2018. 402 с.
2. Вітько В. Брудна бомба на ЗАЕС. *Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення* : зб. наук. статей XVIII м/н науково-практичної конференції (м. Харків, 15–16 вересня 2022 р.). Харків, 2022. С. 92–99.
3. Григор'єв К., Григор'єва Л. Радіоактивні опади в атмосфері та їх радіоекологічний моніторинг у контексті військових дій. *Український журнал природничих наук*. 2025. № 12. С. 344–352.
4. Динаміка викидів та скидів радіонуклідів у природне середовище зони спостереження Південноукраїнської АЕС / В. А. Прилипко, М. М. Морозова, Ю. Ю. Озерова та ін. *Проблеми радіаційної медицини та радіобіології*. 2023. Вип. 28. С. 158–175.
5. Методика розрахунку викидів забруднюючих речовин та парникових газів у повітря від транспортних засобів : Наказ Держ. комітету статистики України від 13.11.2008 № 452. URL: https://ips.ligazakon.net/document/FIN42578 (дата звернення: 12.07.2026).
6. Семененко Ю. М., Коваленко С. І. Зелені технології в транспорті: екологічні аспекти. *Екологічний вісник*. 2019. № 2. С. 31–35.
7. Стан забруднення атмосферного повітря в Україні напередодні повномасштабного російського вторгнення / М. В. Савенець, І. В. Дворецька, Т. В. Козленко та ін. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2023. № 31. С. 69–87.
8. Статистичні дані Головного управління статистики у Миколаївській області: вебсайт. URL: https://ecolog.mk.gov.ua/store/files/1726742763.pdf (дата звернення: 11.07.2026).
9. Степанчук І. М. Автомобільний транспорт і екологічні проблеми міст. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. 2019. № 6. С. 88–93.
10. Стратегія адаптації до зміни клімату для Миколаївської області: Посилення спроможності регіональних та місцевих органів влади для впровадження та застосування законодавства ЄС у сферах захисту навколишнього середовища, протидії кліматичним змінам та розвитку інфраструктурних проєктів. Миколаїв, 2024. 77 с.
11. Ткачук О. П., Вергеліс В. І. Екологічна ефективність громадського моніторингу атмосферного повітря в Україні. *Екологічні науки*. 2020. Т. 1(58). С. 225–232.

Дата першого надходження статті до видання: 17.07.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

УДК 504.3.054:502.1
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.16

СТАН ПОВІТРЯНОГО БАСЕЙНУ ЦЕНТРАЛЬНИХ РЕГІОНІВ УКРАЇНИ ЯК ІНДИКАТОР СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Чугай А.В. (orcid.org/0000-0002-8091-8430),
Чернякова О.І. (orcid.org/0000-0002-5221-6001),
Сазанська М.С. (orcid.org/0009-0006-9951-0503)
Одеський національний університет імені І.І. Мечникова
вул. Змієнка Всеволода, 2, 65082, м. Одеса
avchugai@ukr.net

Щоденно в атмосферне повітря внаслідок військовий операцій, знищення різних видів ворожої бойової техніки та інших процесів надходить значна кількість забруднюючих речовин, які завдають шкоду всім складовим довкілля. Розміри збитків, які заподіяні навколишньому середовищу, за оцінками експертів і науковців є дуже значними. Стан та якість повітряного басейну є прямими чинниками впливу на здоров'я людини та індикаторами сталого розвитку. Центральні регіони України характеризуються індустріально-аграрною спрямованістю. У Полтавській області у структурі виробництва відзначається переважання видобувної галузі. Дослідження присвячено оцінці техногенного впливу на повітряний басейн та його небезпеки для довкілля і здоров'я людини регіонів Центральної України. Основу методичної бази складали декілька методик, які дозволяють виконати комплексний аналіз з урахуванням якісних показників стану атмосферного повітря, визначення ризику для здоров'я людини і оцінки техногенного навантаження на повітряний басейн. За показниками якості атмосферного повітря отримано, що максимальні значення відзначаються у Вінниці (вміст діоксиду азоту і формальдегіду), Полтаві (вміст пилу і формальдегіду), Кременчуці і Черкасах (вміст формальдегіду), Кропивницькому (вміст пилу і формальдегіду), Олександрії (вміст пилу). Максимальні значення індексу небезпеки ризику розвитку неканцерогенних ефектів відзначаються для міст Полтава, Кременчук, Черкаси і у 2023 р. для м. Вінниця. Мінімальні значення індексу відзначались у м. Горишні Плавні. Динаміка зміни обсягів викидів забруднюючих речовин відповідає динаміці зміни модуля техногенного навантаження на повітряний басейн. Відзначено підвищений рівень навантаження для Черкаської області, яка є найменшою за площею. В цілому найбільш техногенного напруженим регіоном є Вінницька область, мінімальні показники відзначаються для Кіровоградської області. *Ключові слова*: повітряний басейн, техногенне навантаження, сталий розвиток, якість, ризик.

The state of the air basin in the central regions of Ukraine as an indicator of sustainable development. Chugai A., Chernyakova O., Sazanska M.

Every day, as a result of military operations, the destruction of various types of different military equipment, and other processes, a significant volume of pollutants is emitted into the atmosphere, which is damaging to all components of the environment. According to estimates by experts and scientists, the environmental damage is very significant. The condition and quality of the air are key factors affecting human health and indicators of sustainable development. The central regions of Ukraine are characterized by an industrial and agricultural focus. In the Poltava Oblast, the extractive industry predominates in the structure of production. This research is focused on assessing the technogenic impact on the air basin and the associated risks to the environment and human health in the regions of Central Ukraine. The methodological basis was formed by several methodologies that enable a comprehensive analysis, taking into account qualitative indicators of atmospheric air quality, the determination of risks to human health, and the assessment of technogenic pressure on the air basin. Based on air quality indicators, the highest levels were recorded in Vinnytsia (nitrogen dioxide and formaldehyde concentrations), Poltava (particulate matter and formaldehyde concentrations), Kremenchuk and Cherkasy (formaldehyde concentrations), Kropyvnytskyi (particulate matter and formaldehyde concentrations), Oleksandriya (particulate matter). The highest values of the risk index for the development of non-carcinogenic effects were recorded in Poltava, Kremenchuk, and Cherkasy, and in 2023 for Vinnytsia. The lowest values of the index were recorded in Horishni Plavni. The trend in changes in pollutant emission levels corresponds to the trend in changes in the technogenic load on the air basin. An elevated level of load has been observed in the Cherkasy Oblast, which is the smallest in area. Overall, the Vinnytsia Oblast is the region with the highest technogenic load, while the lowest levels are observed in the Kirovohrad Oblast. *Key words*: air basin, technogenic load, sustainable development, quality, risk.

Постановка проблеми. Однією з найбільш вразливих складових довкілля, яка зазнає постійного техногенного впливу, є повітряний басейн. З початком бойових дій на всій території України внаслідок збройної агресії росії ця проблема загострилась. Щоденно в атмосферне повітря внаслідок військовий операцій, знищення різних видів ворожої бойової техніки та інших процесів надходить значна кількість забруднюючих речовин, які завдають шкоду всім складовим довкілля. При цьому розміри збитків, які заподіяні навколишньому середовищу, за оцінками експертів і науковців є дуже значними.

© Чугай А.В., Чернякова О.І., Сазанська М.С., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Актуальність дослідження. Зазначимо, що стан та якість повітряного басейну є прямим індикатором впливу на здоров'я людини. Крім того, показники якості атмосферного повітря безпосередньо пов'язані з декількома Глобальними цілями сталого розвитку [1].

Так, ціль 3 «Міцне здоров'я і благополуччя» може вказувати, що забруднення атмосферного повітря є фактором ризику для здоров'я населення. Ціль 11 «Сталий розвиток міст і громад» включає безпосередньо зв'язок якості повітря з екологічною безпекою та комфортністю середовища проживання. Ціль 12 «Відповідальне споживання та виробництво» свідчить в тому числі про необхідність зменшення викидів від промисловості, енергетики, транспорту та інших джерел в атмосферне повітря. І ціль 13 «Пом'якшення наслідків зміни клімату» – це найбільш чіткий орієнтир щодо негативного техногенного впливу на повітряний басейн.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Забезпечення якісного стану атмосферного повітря в регіонах України є складовою частиною «Стратегії сталого розвитку України до 2030 року. Проект – 2017» [2], а саме Стратегічної цілі 2 «Забезпечення сталого галузевого та регіонального розвитку», Стратегічної цілі 5 «Забезпечення переходу до моделей збалансованого споживання і виробництва, збалансованого управління природними ресурсами та зміцнення заходів реагування на зміну клімату».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання оцінки стану і якості атмосферного повітря окремих регіонів України є предметом наукових досліджень багатьох авторів. В якості оціночних параметрів можна використовувати як індекси забруднення атмосфери, які опосередковано характеризують рівень впливу, так і індекси техногенного навантаження. Окремою складовою є визначення ризику для здоров'я людини внаслідок забруднення атмосферного повітря.

Стан повітряного басейну центральних регіонів України в останні роки не досить часто є об'єктом дослідження науковців. Вказані регіони характеризуються індустріально-аграрною спрямованістю. Також у Полтавській області у структурі виробництва відзначається переважання видобувної галузі. За останні роки можна виділити роботу Л.І. Жицької зі співавторами [3] щодо оцінки впливу хімічного забруднення атмосферного повітря на здоров'я населення в Черкаській області.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Відомості щодо сучасного стану повітряного басейну сприятимуть забезпеченню сталого розвитку регіонів і розробці, за необхідності, заходів щодо відновлення довкілля в цілому.

Методологічне або загальнонаукове значення. Дослідження присвячено оцінці техногенного впливу на повітряний басейн та його небезпеки для довкілля і здоров'я людини регіонів Центральної України (Вінницька, Кіровоградська, Полтавська і Черкаська області).

Основу методичної бази складали декілька методик. В цілому вони дають можливість виконати комплексний аналіз з урахуванням оцінки якості атмосферного повітря, визначення ризику для здоров'я людини і оцінки техногенного навантаження на повітряний басейн.

Для оцінки якості атмосферного повітря використано автралійський індекс якості повітря (*AQI*), який розраховується за формулою:

$$I_P = (C_P / C_{Ps}) \cdot 100\ \%, \quad (1)$$

де IP – індекс забруднення; CP – концентрація забруднюючої речовини; CPs – стандартна концентрація забруднюючої речовини [4].

В якості показника C_{Ps} використовувались встановлені і діючі на даний час в Україні $ГДК_{сд}$ [5].

Виділяють 5 категорій якості атмосферного повітря відповідно до значень *AQI*: дуже добра – *AQI* = 0 – 33; добра – *AQI* = 34 – 66; нормальна – *AQI* = 67 – 99; погана – *AQI* = 100 – 149; дуже погана – *AQI* ≥ 150.

З метою оцінки ризику розвитку неканцерогенних ефектів для окремих забруднюючих речовин можна використовувати коефіцієнт небезпеки:

$$HQ = LADI / Rf, \quad (2)$$

де HQ – коефіцієнт небезпеки, безрозмірна величина; Rf – референтна (безпечна) доза, мг/кг [6, 7].

У разі відсутності інформації щодо референтної (безпечної) дози *Rf* можна застосовувати таку формулу:

$$HQ = Ci / C_{ГДК}, \quad (3)$$

де Сі – середня концентрація і-ої забруднюючої речовини, мг/м3 [8].

Ризик розвитку неканцерогенних ефектів для оцінки комбінованого впливу хімічних речовин визначається на основі розрахунку індексу небезпеки:

$$HI = \sum HQi, \quad (4)$$

де HQi – коефіцієнти небезпеки для окремих забруднюючих речовин [9].

Для визначення рівня техногенного навантаження було використано модуль техногенного навантаження на повітряний басейн $M_{ПБ}$ за показниками обсягів викидів забруднюючих речовин, який визначається як загальна сума обсягів викидів за рік, віднесена до площі території (регіону дослідження) [4].

Викладення основного матеріалу. Оцінка стану повітряного басейну центральних регіонів України виконана за 2021 – 2023 рр., які включають як довоєнний період, так і роки повномасштабного вторгнення рф.

Результати оцінки якості повітря м. Вінниця показали, що за вмістом діоксиду азоту і формальдегіду у всі роки якість повітря характеризувалась категорією «дуже погана», а за вмістом діоксиду сірки, оксиду вуглецю та аміаку – категорію «дуже добра». Слід також відзначити суттєве збільшення пилу у повітрі та незначне зменшення вмісту фтористого водню.

У Кіровоградській області спостереження за якістю атмосферного повітря проводяться у трьох містах – Кропивницький, Олександрія, Світловодськ. Отримано, що у містах Кіровоградської області якість повітря характеризувалась категоріями від «дуже добра» до «погана». Категорії «дуже добра» відповідали: вміст оксиду азоту у м. Кропивницький; вміст діоксиду сірки (2022 – 2023 рр.) і оксиду азоту (2021 р.) у м. Світловодськ. Категорії «погана» відповідали: вміст пилу і формальдегіду у Кропивницькому; вміст пилу і сажі в Олександрії; вміст діоксиду азоту і формальдегіду (2022 р.) у Світловодську. Слід також відзначити збільшення вмісту у повітрі оксиду вуглецю у м. Кропивницький за роки дослідження.

У Полтавській області спостереження також здійснюються у трьох містах – обласному центрі м. Полтава і промислових містах Кременчук та Горишні Плавні. Так, у містах Полтавської області відзначено категорії від «дуже добра» до «дуже погана». Категорія «дуже добра» відзначалась:

– у м. Полтава за вмістом діоксиду сірки, оксиду азоту, хлористого водню;

– у м. Кременчук за вмістом діоксиду сірки і оксиду вуглецю;

– у м. Горишні Плавні за вмістом переважної більшості ЗР.

Категорія «дуже погана» відзначалась за вмістом формальдегіду у м. Полтава (2021 – 2022 р.) та у м. Кременчук. Зазначимо, що вміст формальдегіду у м. Полтава у 2023 р. характеризувався категорією «нормальна» (зменшення концентрації майже у 3 рази). На нашу думку така інформація потребує уточнення або з'ясування причин такого різкого зменшення концентрацій даної речовини.

У м. Черкаси якість повітря також характеризувалась категоріями від «дуже добра» до «дуже погана». Категорія «дуже добра» відзначалась за вмістом діоксиду сірки, оксиду вуглецю і оксиду азоту (2022 – 2023 рр.). Категорія «дуже погана» відзначалась за вмістом формальдегіду. Слід відзначити зменшення у 2022 -2023 рр. вмісту у повітрі сполук азоту.

Було виконано порівняльну оцінку якості атмосферного повітря в регіонах Центральної України за вмістом основних і деяких специфічних забруднюючих речовин (рис. 1). Як видно, до категорії з найгіршими показниками якості входять міста Вінниця (за вмістом діоксиду азоту і формальдегіду), Полтава (за вмістом пилу і формальдегіду), Кременчук і Черкаси (за вмістом формальдегіду), Кропивницький (за вмістом пилу і формальдегіду) і Олександрія (за вмістом пилу).

Також було виконано порівняльний аналіз динаміки зміни індексу небезпеки *HI* за результатами розрахунку коефіцієнту небезпеки *HQ* для окремих

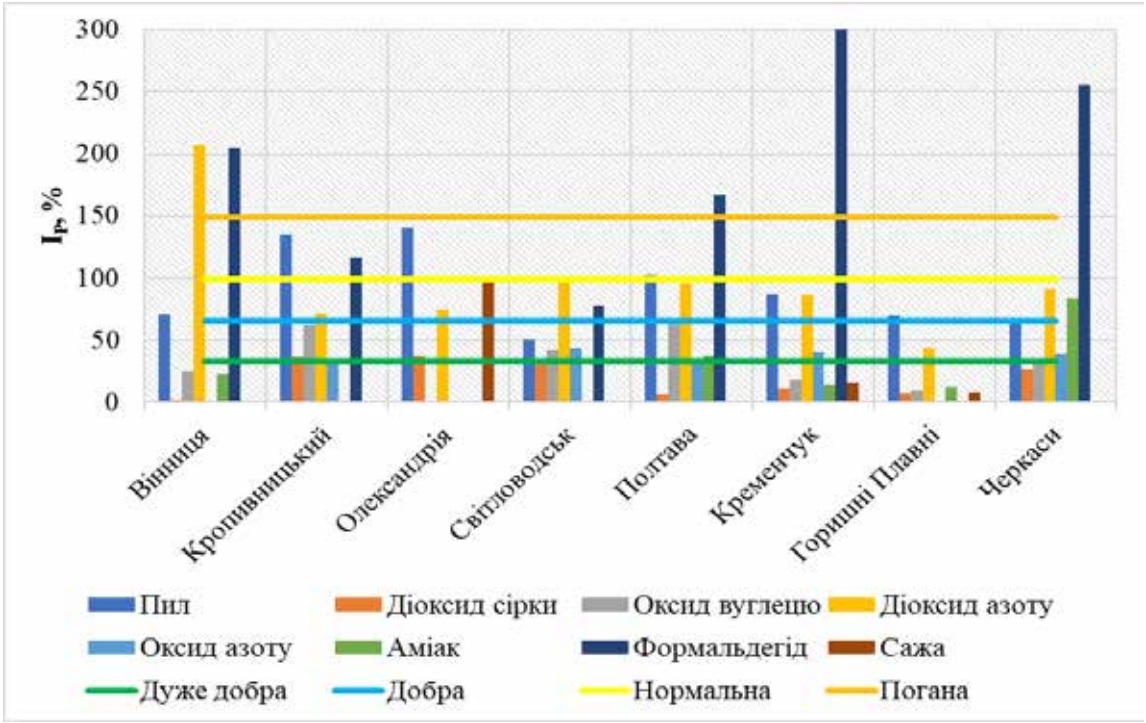


Рис. 1. Осереднені значення індексу якості повітря I_P для міст Центральної України у 2021 – 2023 рр.

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

міст Центральної України (рис. 2). Максимальні значення *HI* відзначаються для міст Полтава, Кременчук, Черкаси і у 2023 р. для м. Вінниця. Слід відзначити, що кількість забруднюючих речовин, які були враховані для м. Черкаси, складає 7, а для міст Полтава і Кременчук – 9. Проте високі показники вмісту формальдегіду у повітряному басейні м. Черкаси сприяли формуванню високих значень коефіцієнту небезпеки *HI*. Мінімальні значення коефіцієнту відзначались у м. Горишні Плавні. Міста Кіровоградської області характеризуються середніми значеннями коефіцієнту небезпеки *HI* серед міст Центральної України. У розрізі часового ходу відзначено збільшення показника *HI* у Вінниці і незначне зменшення у Полтаві і Черкасах.

Оцінка рівня техногенного навантаження на повітряний басейн із використанням модуля техногенного навантаження $M_{ПБ}$ показала:

– у Вінницькій області за період дослідження рівень навантаження не змінювався;

– у Кіровоградській і Полтавській областях відзначено зменшення загального рівня навантаження; у Полтавській області різке зменшення відбулось у 2022 р., що може бути пов'язано з початком повномасштабного вторгнення рф на територію України і суттєвим скороченням промислових викидів в регіоні, враховуючи його переважну індустріальну спрямованість;

– у Черкаській області відзначено збільшення рівня навантаження у 2023 р. У регіоні переважає аграрна галузь економіки, що могло сприяти підвищенню обсягів викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря через інтенсифікацію сільськогосподарського виробництва в останні роки.

На рис. 3 наведено результати порівняльного аналізу. Як видно, динаміка зміни обсягів викидів забруднюючих речовин фактично повністю відповідає динаміці зміни показника $M_{ПБ}$. Такий розподіл можна пояснити тим, що досліджувані області не мають суттєвої різниці за площею території – від 20900 км^2 для Черкаської області до 28748 км^2 для Полтавської області. Слід відзначити підвищений рівень навантаження за відносними показниками для Черкаської області, яка є найменшою за площею.

Головні висновки. У дослідженні виконано оцінку техногенного навантаження на повітряний басейн та його небезпеки для довкілля і здоров'я людини регіонів Центральної України за період 2021 – 2023 рр. Отримані результати дозволяють зробити такі висновки:

1. Порівняльна оцінка якості атмосферного повітря показала, що до категорії з найгіршими показниками входять міста Вінниця (за вмістом діоксиду азоту і формальдегіду), Полтава (за вмістом пилу і формальдегіду), Кременчук і Черкаси (за вмістом формальдегіду), Кропивницький (за вмістом пилу і формальдегіду) і Олександрія (за вмістом пилу).

2. Максимальні значення індексу небезпеки ризику розвитку неканцерогенних ефектів відзначаються для міст Полтава, Кременчук, Черкаси і Вінниця (2023 р.). Мінімальні значення індексу відзначались у м. Горишні Плавні. Міста Кіровоградської області характеризуються середніми значеннями *HI* серед міст Центральної України.

3. Динаміка зміни обсягів викидів забруднюючих речовин фактично повністю відповідає динаміці зміни показника $M_{ПБ}$. Досліджувані області не мають суттєвої різниці за площею території. Відзначено

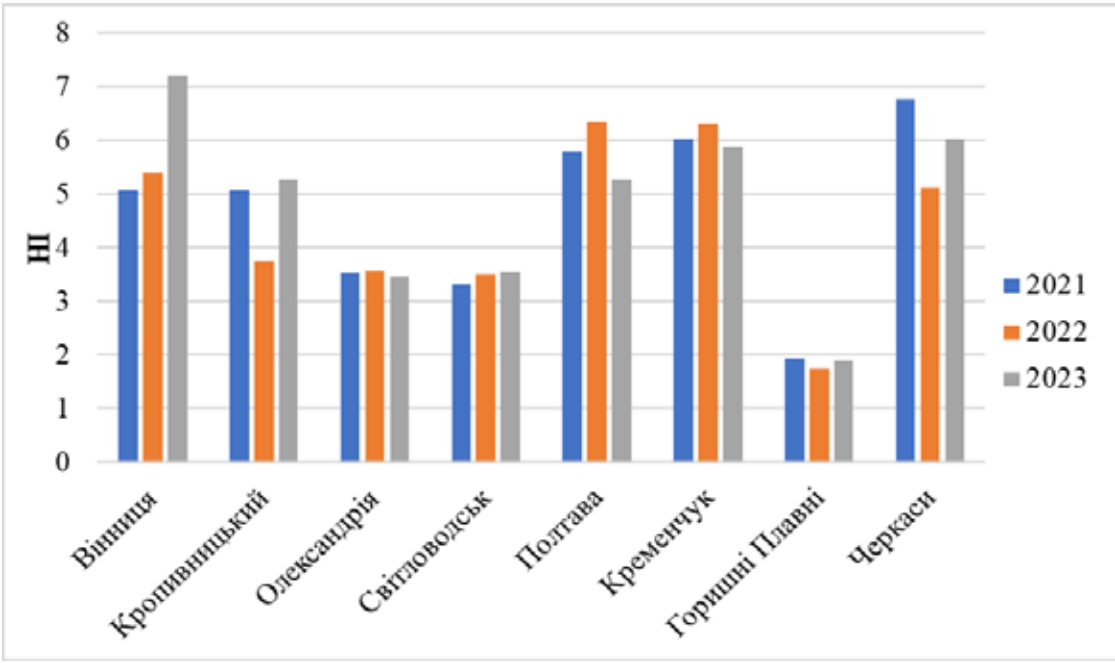


Рис. 2. Значення коефіцієнту небезпеки HI для міст Центральної України



Рис. 3. Порівняльний аналіз динаміки викидів забруднюючих речовин та зміни показника $М_{ПБ}$ для регіонів Центральної України у 2021 – 2023 рр.

підвищений рівень навантаження за відносними показниками для Черкаської області, яка є найменшою за площею.

Так, найбільш техногенного напруженим регіоном є Вінницька область. Мінімальні показники навантаження відзначаються для Кіровоградської області. Отримані результати є основною для розробки регіональних природоохоронних стратегій з метою покращення стану довкілля і мінімізації техногенного навантаження на повітряний басейн.

Література

1. ЦСР у дії. URL: https://www.undp.org/uk/ukraine/tsili-staloho-rozvytku (дата звернення: 14.08.2026).
2. Стратегія сталого розвитку України до 2030 року. Проект – 2017. URL: https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/migration/ua/UNDP_Strategy_v06-optimized.pdf (дата звернення: 13.07.2025).
3. Жицька Л.І., Єгорова О.В., Хоменко О.М., Бондаренко Ю.Г. Оцінка впливу хімічного забруднення атмосфери на формування канцерогенних і неканцерогенних ризиків для здоров'я населення міст Черкаської області. *Екологічна безпека та природокористування*. 2025. Вип. 3 (55). С. 177 – 190. https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.3.177-190.
4. Чугай А.В., Сафранов Т.А. Методи оцінки техногенного впливу на довкілля. Навчальний посібник. Одеса: Букаєв Вадим Вікторович, 2021. 118 с.
5. Гранично допустимі концентрації хімічних і біологічних речовин в атмосферному повітрі населених місць (наказ Міністерства охорони здоров'я України від 10 травня 2024 року № 813). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0763-24#n9 (дата звернення: 02.05.2026).
6. Integrated Risk Information System (IRIS). U.S. Environmental Protection Agency (EPA). URL: http://www.epa.gov/iris (дата звернення: 22.04.2026).
7. Коваленко Г.Д., Півень Г.В., Рибалова О.В. Екологічний ризик погіршення стану навколишнього природного середовища України при збереженні існуючих тенденцій антропогенного навантаження. *Збірник наукових статей V міжнародної науково-практичної конференції «Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення»*. Харків: Райдер, 2009. С. 52 – 56.
8. Мовчан Я.І., Рибалова О.В., Гулевець Д.В. Оцінка екологічного ризику погіршення сучасного стану урбанізованих територій. *Східно-Європейський журнал провідних технологій.* 2013. Т. 3, № 11 (63). С. 37 – 41.
9. Методичні рекомендації МР 2.2.12-142-2007. Оцінка ризику для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря. Затверджено Наказом МОЗ України від 13.04.07 р. № 184. Київ, 2007. 40 с.

Дата першого надходження статті до видання: 07.09.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

УДК 528.88:504.064.4.03
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.17

ГІДРО-ГЕОЕКОЛОГІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ГЛИБИНИ ВІДКРИТОЇ РОЗРОБКИ ГУЛЯЙПІЛЬСЬКОГО РОДОВИЩА ЗАЛІЗИСТИХ КВАРЦИТІВ З УРАХУВАННЯМ ДЕПРЕСІЙНОЇ ЛІЙКИ ТА НАПРЯМІВ СТОКУ

Касьяненко Д.Л. (orcid.org/0009-0008-8344-1958)
Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»
вул. Липківського В. Митрополита, 35, к. 2, 03035,Київ
law@kasyanenko.com.ua

Окреслено гідро-екологічне обґрунтування доцільної глибини відкритої розробки Гуляйпільського родовища залізистих кварцитів з урахуванням особливостей геологічної будови, водоносності гірського масиву, параметрів фільтрації, напрямів природного поверхневого стоку та прогнозованої зміни гідродинамічного режиму. Гуляйпільське родовище характеризується складною багатопластовою гідрогеологічною системою, у межах якої встановлено сім водоносних горизонтів. Основними водоносними комплексами, що визначають обводнення території, є безнапірний полтавсько-харківський горизонт, а також напірні горизонти кори вивітрювання і тріщинуватих докембрійських кристалічних порід.

Уточнено підхід до оцінки радіусу депресійної лійки при прогнозованої глибині кар'єру 400 м. Для попередньої оцінки застосовано емпіричну залежність Кусакіна та розглянуто діапазон можливого зниження рівня в основному безнапірному горизонті. Розрахунок радіусу депресійної лійки 13,2 км для кар'єру глибиною 400 м не слід використовувати як остаточний науковий результат, оскільки в ньому глибина кар'єру фактично ототожнюється зі зниженням рівня води. Для водоносного горизонту потужністю близько 35 м це фізично некоректно. Альтернативна оцінка на основі модуля підземного стоку, за якою радіус становить близько 7,3 км також має сенс. Але, показано, що при зниженні рівня на 10–35 м орієнтовний радіус впливу може становити близько 0,32–1,13 км за прийнятих середніх параметрів горизонту, тоді як для всієї багатопластової системи реальна зона впливу може бути істотно більшою і потребує чисельного моделювання.

Встановлено, що природний поверхневий стік території спрямований до ярково-балкової мережі, зокрема балок Гончариха, Різана, Шестипол'є, Солона, Попова та Кучерявська. Формування відкритого кар'єрного простору змінює гідрологічний градієнт і створює умови для концентрації поверхневого та підземного стоку в напрямку гірничої виробки. На основі комплексного аналізу запропоновано розглядати глибину 400 м як гідрогеоекологічно обґрунтовану межу відкритої розробки за умови створення ефективної системи дренажу, моніторингу рівнів підземних вод та подальшого переходу до підземного видобування.
Ключові слова: Гуляйпільське родовище, залізисті кварцити, кар'єр, підземні води, депресійна лійка, водоприплив, коефіцієнт фільтрації, поверхневий стік, гідрогеологічний режим, комбінований спосіб розробки, екологічна безпека.

Hydrogeoecological justification of the depth of open-cast mining at the Hulyaypil iron-bearing quartzite deposit, taking into account the depression cone and drainage patterns. Kasyanenko D.

This article presents a hydrogeo-ecological justification for the optimal depth of open-cast mining at the Hulyaypil iron-bearing quartzite deposit, taking into account the characteristics of the geological structure, the aquifer capacity of the mountain massif, filtration parameters, the directions of natural surface runoff, and the predicted changes in the hydrodynamic regime. The Hulyaypil deposit is characterised by a complex, multi-layered hydrogeological system, within which seven aquifers have been identified. The main aquifer complexes determining the water supply to the area are the unconfined Poltava–Kharkiv aquifer, as well as the confined aquifers of the weathering crust and fractured Precambrian crystalline rocks.

The approach to estimating the radius of the depression funnel has been refined for a projected quarry depth of 400 m. For a preliminary assessment, Kusakin's empirical relationship was applied and the range of possible water level drawdown in the main unconfined aquifer was considered. The calculated depression funnel radius of 13.2 km for a 400-metre-deep quarry should not be regarded as a definitive scientific result, as it effectively equates the quarry depth with the water level drawdown. For an aquifer with a thickness of approximately 35 metres, this is physically incorrect. An alternative estimate based on the underground flow modulus, which gives a radius of approximately 7.3 km, is also plausible. However, it has been shown that with a water level drop of 10–35 m, the approximate radius of influence may be around 0.32–1.13 km under the assumed average aquifer parameters, whereas for the entire multi-layer. *Key words:* Gulyaypil deposit, ferruginous quartzites, quarry, groundwater, depression cone, inflow, filtration coefficient, surface runoff, hydrogeological regime, combined mining method, environmental safety.

© Касьяненко Д.Л., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. Розвиток гірничодобувної промисловості супроводжується масштабною трансформацією геологічного середовища. Особливо значний вплив виникає під час відкритої розробки потужних крутопадаючих рудних тіл, коли формування глибокого кар'єрного простору супроводжується розкриттям декількох водоносних горизонтів, зміною гідрогеологічного балансу та необхідністю постійного водовідливу. При цьому глибина кар'єру безпосередньо визначає вертикальний інтервал порушення гірського масиву, однак не є тотожною величині зниження рівня підземних вод, що необхідно враховувати при оцінюванні зони гідрогеологічного режиму.

Одним із найбільш суттєвих наслідків тривалого водовідливу є формування депресійної лійки, розміри якої залежать від водопровідності, коефіцієнту фільтрації, потужності та водовіддачі водоносних горизонтів, а також інтенсивності й тривалості дренування. У багатопластовій гідрогеологічній системі зона впливу кар'єру може поширюватися за межі його безпосереднього контуру та охоплювати суміжні водоносні комплекси, що створює передумови для зміни напрямів і швидкості фільтраційних потоків.

Додатковим фактором гідрогеоекологічної трансформації є зміна природного поверхневого стоку внаслідок формування великої від'ємної форми рельєфу. Глибокий кар'єр може перехоплювати частину поверхневого та підземного стоку, змінювати положення вододілів локального рівня та спрямовувати водні потоки до системи водовідливу. У результаті порушується природний розподіл водного балансу між атмосферними опадами, поверхневим стоком, інфільтрацією та підземним стоком.

У зв'язку з цим виникає наукова та практична проблема визначення такої глибини відкритої розробки, за якої забезпечується раціональне освоєння мінеральних ресурсів за одночасного обмеження негативного впливу на підземні та поверхневі води.

Для її вирішення необхідне комплексне врахування не лише гірничотехнічних параметрів родовища, а й гідрогеологічних характеристик водоносних горизонтів, величини прогнозованого водоприпливу, параметрів депресійної лійки, природних напрямів поверхневого стоку та їх можливої трансформації під впливом гірничих робіт. Такий підхід дозволяє перейти від оцінювання впливу кар'єру лише за його геометричними параметрами до визначення просторової зони фактичної гідрогеоекологічної трансформації території.

Актуальність дослідження. Особливої актуальності проблема набуває для родовищ, у межах яких водоносні горизонти мають різні фільтраційні властивості та гідравлічний зв'язок між собою. У таких умовах поглиблення кар'єру може послідовно залучати до водообміну нові водоносні комплекси, змінювати гідродинамічні градієнти та збільшувати обсяг дренажних вод. Водночас локальні зони підвищеної тріщинуватості кристалічних порід можуть створювати шляхи інтенсивної фільтрації та зумовлювати нерівномірний просторовий розподіл водоприпливу.

Гуляйпільське родовище (ГПР) залізистих кварцитів (ЗК) є перспективним об'єктом відкритої розробки. Родовище має складну геологічну будову, круте падіння рудних тіл і значну вертикальну потужність [1]. Площа ГПР становить 936 га, протяжність продуктивного пласта – близько 17 км, середня потужність розкриву – близько 120 м, а розвідана глибина запасів сягає 600 м. Саме значна глибина залягання рудного тіла створює принципове питання щодо межі економічно та екологічно прийнятної відкритої розробки.

Актуальність дослідження зумовлена також необхідністю кількісного оцінювання просторових меж гідрогеологічного впливу глибоких кар'єрів. Дослідження [2] показали, що визначення радіуса впливу шахтного дренажу є складним завданням, оскільки форма і поширення депресійної лійки залежать від неоднорідності водоносного середовища, геологічної будови та наявності тектонічних порушень. Автори підкреслюють, що в реальних умовах депресійна область не має чіткої межі, а її конфігурація може істотно відрізнятися від ідеалізованої осесиметричної моделі. Математичне визначення радіусу впливу було вперше сформульовано Дюпюї ще у 1863 р. як верхня межа інтегрування в диференціальному рівнянні, розв'язком якого є формула притоку води у свердловину в умовах стаціонарного потоку ґрунтових вод. Але, особливість шахти чи кар'єру полягає в тому, що, на відміну від колодязя, радіус впливу стоку з виробок зазвичай охоплює різні водоносні горизонти на площі, яка іноді становить кілька тисяч км^2. Отже, актуальність дослідження ГПР визначається необхідністю поєднання гірничотехнічних параметрів з кількісними гідрогеологічними характеристиками.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Авторський доробок спрямований на вирішення актуального науково-практичного завдання гідрогеоекологічного обґрунтування параметрів відкритої розробки ГПР ЗК з урахуванням трансформації природного гідрогеологічного та гідрологічного режимів території. Необхідність такого дослідження обумовлена значною глибиною поширення рудних покладів, складною будовою водоносної системи та потенційним формуванням значного водоприпливу при поглибленні кар'єру.

Попередні дослідження Гуляйпільського родовища були спрямовані на комплексну оцінку потенційного впливу його промислового освоєння на компоненти довкілля [3]. У науковій праці [4] окреслено аналіз базового стану природного середовища та прогнозованих змін унаслідок відкритої розробки родовища. Розвитком цього напряму є запропоно-

ване в даній роботі поглиблення гідрогеоекологічної складової оцінювання. Основна увага зосереджується на встановленні взаємозв'язку між глибиною відкритої гірничої виробки, параметрами водоносних горизонтів, коефіцієнтами фільтрації, величиною водоприпливу, формуванням депресійної лійки та зміною напрямів поверхневого і підземного стоку.

Важливим аспектом авторського доробку є розмежування поняття глибини кар'єру та величини зниження рівня підземних вод. Глибина кар'єру визначає геометричний масштаб втручання у геологічне середовище, тоді як величина зниження рівня води залежить від умов дренування, гідравлічних властивостей водоносних горизонтів, їх потужності, водопровідності та гідравлічного зв'язку з іншими водоносними комплексами. Це дозволяє коректніше визначати радіус депресійної лійки та просторову зону гідрогеологічного впливу.

Практичне значення наукової праці – використання отриманих результатів під час обґрунтуванні проектних параметрів кар'єру, виборі технологічної схеми видобування, визначенні необхідності та масштабів водовідливу, формуванні системи гідрогеологічного моніторингу та плануванні природоохоронних заходів.

Методи досліджень. Методична основа дослідження сформована на основі аналізу геологічних, гідрогеологічних та геоморфологічних даних ГПР, а також сучасних наукових підходів до оцінки впливу відкритих гірничих робіт на водні ресурси. Застосовано наступні методи досліджень: аналіз геологічної та гідрогеологічної інформації; порівняльний аналіз технологічних сценаріїв; морфометричний аналіз рельєфу земної поверхні; математичний розрахунок та аналіз напрямів поверхневого стоку; оцінювання фільтраційних властивостей водоносних горизонтів; аналітичну оцінку радіусу впливу водовідливу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для України ця проблема є особливо актуальною для залізорудних районів, де багаторічне функціонування гірничих підприємств уже призвело до істотної трансформації природного рельєфу та гідрогеологічного режиму. За даними [6], тривала розробка родовищ Кривбасу змінила геоморфологічну та гідрогеологічну структуру території, а щорічний обсяг дренажних вод у регіоні оцінювався приблизно в 1 км³.

Сучасні дослідження Криворізького басейну також показують, що неоднорідність водоносних товщ, тріщинуватість кристалічних порід, техногенні колектори у відвалах та зміна фільтраційних потоків формують депресійні області, які можуть поширюватися за межі безпосереднього контуру кар'єру. В дослідженнях [7] підкреслено, що водовідлив впливає не лише на рівень підземних вод, а й на напружено-деформований стан масиву, стійкість бортів та процеси деформації поверхні.

Подібні закономірності встановлені й у міжнародних дослідженнях Наприклад, в роботі [8], де за допомогою синтетичного чисельного моделювання підземних вод із використанням MODFLOW, автори моделювали умовний великий кар'єр, який експлуатувався протягом 20 років, після чого моделювали відновлення рівнів підземних вод протягом 100 років. Моделювання відновлення рівня підземних вод після закриття відкритих гірничих виробок показало, що масштаб депресійної області визначається не тільки величиною водовідбору, а й водопровідністю та водовіддачею водоносного горизонту. Тому визначення оптимальної глибини відкритої розробки повинно здійснюватися не лише за гірничотехнічними або економічними критеріями, а й з урахуванням гідрогеологічних обмежень.

Отже, аналіз сучасних досліджень засвідчує, що оцінювання впливу відкритих гірничих робіт на гідрогеологічне середовище поступово переходить від локального визначення водоприпливу до комплексного просторового аналізу водоносної системи.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується означена стаття. Незважаючи на значний обсяг виконаних досліджень, у сучасних роботах враховуються неоднорідність фільтраційних властивостей, гідравлічний зв'язок між горизонтами, тріщинуватість масиву, параметри водовідливу, поверхневий стік та довготривала зміна рівнів підземних вод. Разом з тим, для умов ГПР ЗК залишається недостатньо дослідженим питання комплексного взаємозв'язку глибини відкритої розробки, водоприпливу, параметрів депресійної лійки, фільтраційних властивостей окремих водоносних горизонтів та зміни напрямів поверхневого стоку. Особливого значення набуває визначення того, як змінюється гідрогеологічна зона впливу при переході від кар'єру глибиною 400 м до глибшої відкритої розробки, а також оцінювання переваг комбінованої схеми «кар'єр – підземна розробка».

Новизна. Наукова новизна роботи полягає у комплексному гідрогеоекологічному оцінюванні впливу відкритої розробки Гуляйпільського родовища залізистих кварцитів до глибини 400 м з одночасним урахуванням гідрогеологічної будови території, фільтраційних властивостей водоносних горизонтів, прогнозованого водоприпливу, формування депресійної лійки та трансформації природних напрямів поверхневого стоку. Уточнено просторову схему гідрогеологічного впливу глибокої кар'єрної виїмки шляхом розмежування геометричної глибини кар'єру та фактичної величини зниження рівня підземних вод. Це дозволяє розглядати депресійну лійку не як безпосереднє продовження контуру кар'єру, а як самостійну просторову область зміни гідродинамічного режиму, параметри якої визначаються властивостями конкретного водоносного горизонту. Удосконалено підхід до оцінювання зони гідрогео-

логічного впливу шляхом спільного врахування коефіцієнта фільтрації, потужності водоносного горизонту та величини зниження рівня підземних вод при визначенні параметрів депресійної лійки.

Виклад основного матеріалу. Гуляйпільське родовище (рис. 1) розташоване на північно-західній окраїні Консько-Ялинського малого артезіанського басейну в межах області тріщинних вод Українського кристалічного масиву.

У межах родовища встановлено сім водоносних горизонтів (табл. 1). Найбільше значення для формування водоприпливу мають: четвертинний, полтавсько-харківський, харківський, бучацький, верхньокрейдовий, горизонт кори вивітрювання та води тріщинних зон докембрійських кристалічних порід.

Четвертинний горизонт має потужність 5–11 м, вільну поверхню, а рівень ґрунтових вод залягає на глибині 1,2–3,8 м. Його багатоводність характеризується як слабка.

Найбільше значення для відкритої розробки має полтавсько-харківський водоносний горизонт. У межах проектованої зони його потужність становить приблизно 19–49 м. Горизонт безнапірний, має гідравлічний зв'язок із нижчими горизонтами, а рівні води загалом знижуються у напрямку зі сходу на захід. Коефіцієнт фільтрації змінюється від 0,8 до 14,8 м/добу, водопровідність – від 34 до 249 м²/добу, питомий дебіт свердловин досягає 5,13 м³/год.

Особливе значення має горизонт тріщинних вод докембрійських кристалічних порід. Його водоносність безпосередньо залежить від ступеня тріщинуватості та вивітрілості. Найбільш інтенсивні тріщинні зони простежуються в інтервалі приблизно 100–200 м, а коефіцієнт фільтрації за окремими зонами може досягати 10,8 м/добу. Це означає, що гідрогеологічна система родовища не може розглядатися як однорідний водоносний пласт. Вона являє собою взаємопов'язану систему осадових і тріщинних колекторів із різними параметрами фільтрації.

Загальний прогнозований водоприплив до кар'єру становить до 1500 м³/год, а за окремими розрахунками експлуатаційний приплив підземних вод може становити 700–1200 м³/год; разом з атмосферним стоком – близько 1100–1500 м³/год.

Формування депресійної лійки є одним із ключових гідрогеологічних наслідків глибокого кар'єрного водовідливу. У процесі відкачування води з гірничої виробки відбувається зниження рівня підземних вод. Навколо зони водовідливу формується область понижених напорів, а градієнт фільтраційного потоку



Рис. 1. Деталізація фактичного матеріалу району досліджень

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

Таблиця 1

Основні гідрогеологічні характеристики водоносних горизонтів ГПР

Водоносний горизонт	Характер залягання	Орієнтовна потужність, м	Коефіцієнт фільтрації, м/добу	Гідрогеологічна характеристика	Значення для кар'єру
Четвертинний	Безнапірний	5–11	–	Ґрунтові води, рівень 1,2–3,8 м	Формування поверхневого та ґрунтового стоку
Полтавсько-Харківський	Безнапірний	19–49	0,8–14,8	Найбільш значущий верхній водоносний горизонт	Основний об'єкт депресії
Харківський	Напірний/ напівнапірний	змінна	–	Гідравлічний зв'язок з іншими горизонтами	Можливий перерозподіл напорів
Бучацький	Напірний	змінна	–	Глибший водоносний комплекс	Потенційне залучення при поглибленні
Верхньокрейдовий	Напірний	змінна	–	Розвинений локально	Потенційна зона гідравлічного впливу
Кора вивітрювання	Напірний/ тріщинний	змінна	до 10,8	Пов'язана з тріщинуватістю кристалічних порід	Важливий фактор водоприпливу
Тріщинні води докембрійських порід	Тріщинний	значна вертикальна потужність	до 10,87	Водоносність контролюється тріщинуватістю	Потенційно значний приплив при глибокому кар'єрі

Таблиця 2

Вихідні дані для основного Полтавсько–Харківського безнапірного водоносного горизонту

№	Параметр	
1	Коефіцієнт фільтрації K	7,8 м/добу
2	Потужність горизонту H	35 м
3	Глибина кар'єру	400 м
4	Прогнозний водоприплив	850 -1600 м³/год

змінює природний напрямок у бік кар'єру. Сучасні дослідження підтверджують, що площа впливу водовідливу може значно перевищувати площу самого відкритого гірничого об'єкта. Наприклад, у модельному дослідженні [8] після 20 років водовідливу зона зниження рівня понад 10 м поширювалася приблизно на 12 км за сприятливих для фільтрації умов і на 6,5 км за меншої водопровідності.

Гідрогеологічні умови Гуляйпільського родовища дозволяють визначити радіус депресійної лійки для сценарію - кар'єр до 400 м. Вихідні дані для основного полтавсько–харківського безнапірного водоносного горизонту (табл. 1) беремо як середні параметри (табл. 2).

Радіус депресійної лійки при використанні формули Прокладкіна або Кусакіна для безнапірного горизонту має наступний вигляд:

$$R=2S\sqrt{K\cdot H}$$

де: R – радіус депресійної лійки, м; K – коефіцієнт фільтрації, м/добу; H - потужність горизонту, м; S – величина зниження рівня води (глибина кар'єру), м.

Тобто, маємо $R=2\cdot 400\sqrt{7,8\cdot 35}=3216$ м або R=13.218км

При цьому, площа депресійної лійки розраховується за формулою:

$$F=\pi R^2$$

де: F – площа депресійної лійки, м²; R – радіус депресійної лійки, м

$$F=3.14\cdot 13,218^2=548.6 \text{ км}^2$$

При радіусі впливу близько 13 км (рис. 2) зона депресії виходить далеко за межі контуру кар'єру та охоплює значну частину прилеглої території. Це свідчить про високу ймовірність зниження рівнів ґрунтових вод, порушення природного гідрогеологічного режиму і необхідність застосування системи дренажних та природоохоронних заходів.

Радіус депресії (R) можна розрахувати ще за одною схемою. Це буде оцінка для умов активного взаємозв'язку усіх обводнених порід при вскри-

ванні і розробці родовища – покривних (надрудних) осадових і тріщинуватих рудно-кристалічних порід. З врахуванням значення модулю підземного стоку М, який дуже орієнтовно варіює в межах М~0.5÷ 3.0 дм^3/сек·км^2=43-260 м^3/добу·км^2.

Тоді при критичному водоприпливі Q =1800 м^3/год = 43200 м^3/добу максимальний радіус депресії R може досягти

$$R=(\frac{Q}{A}\cdot M)*0.5$$

де: Q - максимальний водоприплив, м^3/добу; R - радіус депресії, км; М - модуль підземного стоку, дм^3/сек·км^2

$$R= (43200/3.14\cdot 260)*0.5=7.3км$$

Цей розрахований радіус депресії в 7,3 км (рис. 2) майже в 1,8 рази менш ніж при першому сценарію.

Але, попередній розрахунок депресійної лійки для сценарію кар'єру до 400 м., де для розрахунку прийнято що глибина кар'єру (400 м) фактично прирівнювалася до величини зниження рівня (S), потребує методичного уточнення.

Для безнапірного горизонту з потужністю близько 35 м максимальне повне осушення саме цього горизонту не може бути інтерпретоване як зниження рівня на 400 м. Якщо для попередньої оцінки розглянути зниження рівня (S) на 10, 20, 30 та 35 м, отримаємо значно меншу площу впливу (табл. 3).

Розрахунок демонструє важливий результат: для конкретного полтавсько-харківського горизонту радіус депресійної лійки визначається не глибиною кар'єру як такою, а фактичним зниженням рівня води, потужністю горизонту та коефіцієнтом фільтрації. Разом з тим наведені значення не слід трактувати як остаточний прогноз. Гуляйпільське родовище має гідравлічно пов'язані горизонти, зокрема полтавсько-харківський горизонт, кору вивітрювання та тріщинні докембрійські породи. Тому фактична зона впливу всієї системи може бути більшою за аналітичний радіус, отриманий для одного горизонту. Саме тому для проектних рішень доцільним може бути чисельне моделювання фільтрації.

Загальний висновок полягає в тому, що розрахований радіус депресійної лійки в 13,2 км, не є достовірно визначений. Його можна згадувати лише як попередню, методично спрощену оцінку, яка потребує перевірки. Альтернативна оцінка на основі модуля підземного стоку, за якою радіус становить близько 7,3 км також має сенс. Такий розкид результатів – від близько 1 км для окремого горизонту до кількох кілометрів для інтегрованої системи – є аргументом на користь багатошарової чисельної моделі.

Наприклад, показовим аналогом для оцінювання гідрогеологічного впливу залізорудної відкритої розробки є кар'єр Хоуп-Даунс-Норт (Західна Австралія). За фактичними моніторинговими даними [9], при експлуатації кар'єру унаслідок дренування, рівень підземних вод знижувався приблизно на 75–130 м, а зона гідрогеологічного впливу поширювалася приблизно на 6–8 км від гірничої виробки. Порівняння отриманих розрахункових параметрів для ГПР ЗК

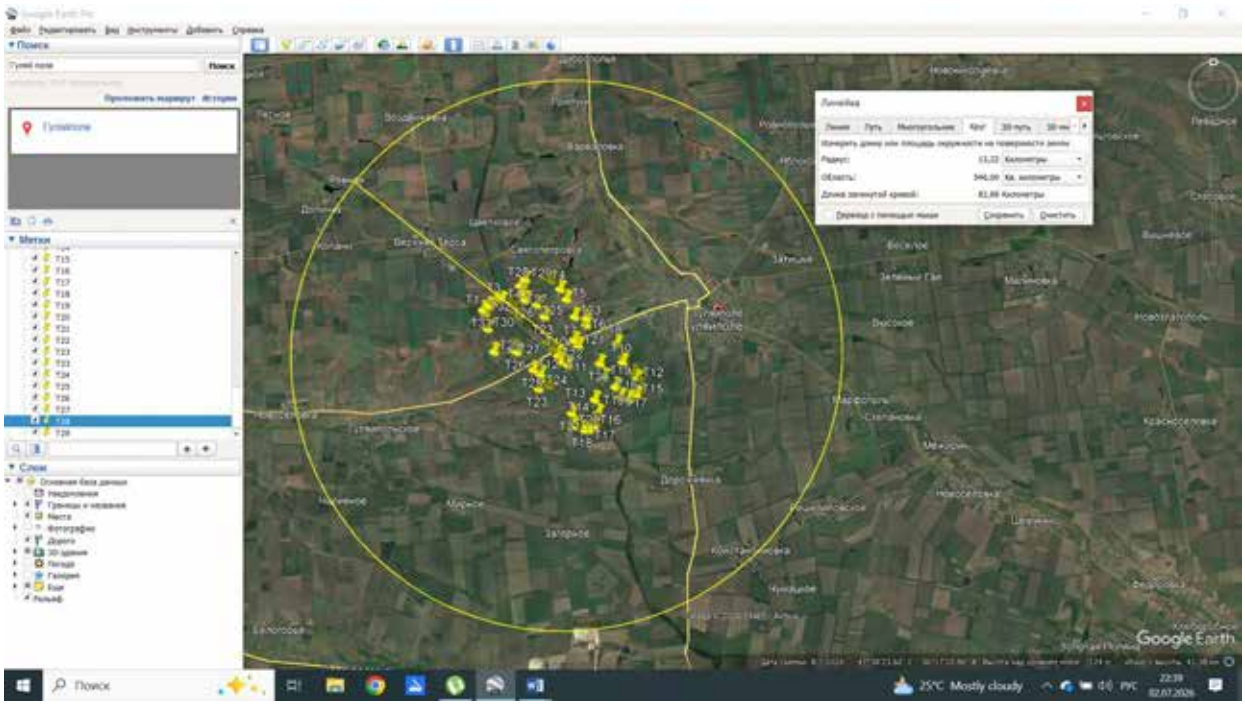


Рис. 2. Зона депресії майбутнього кар'єру до 400 м відпрацювання (основа - наведені координати Західного і Східного покладів), R-13.21км

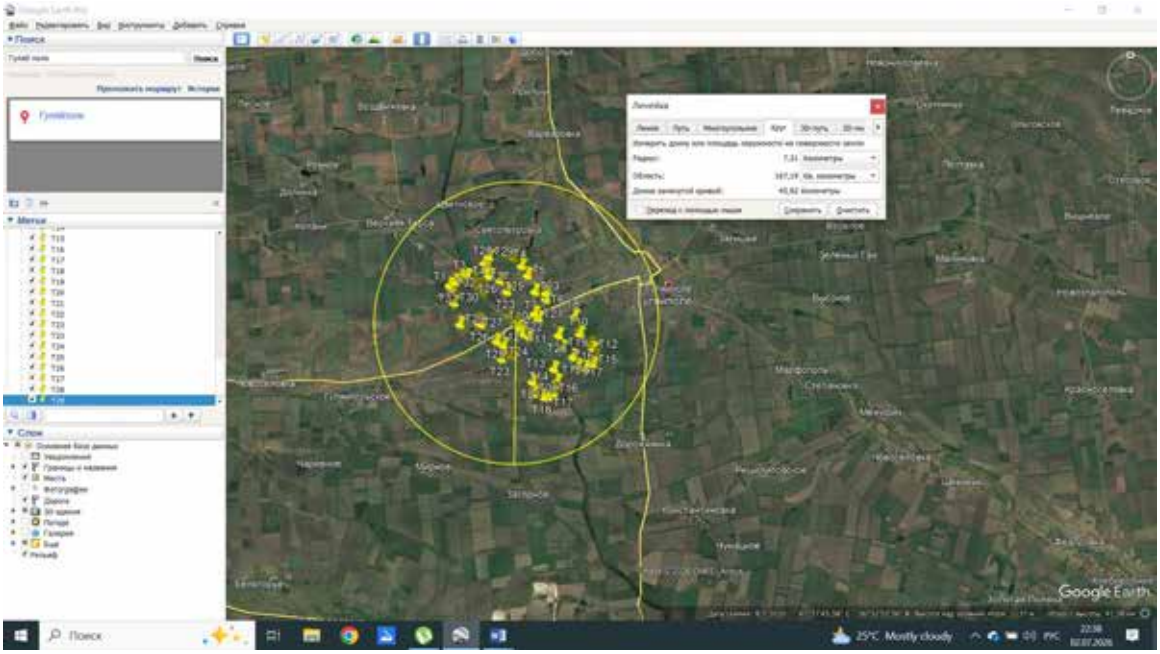


Рис. 3. Зона депресії майбутнього кар'єру до 400 м відпрацювання (основа - наведені координати Західного і Східного покладів), R-7.3км

Таблиця 3

Оцінка зниження рівня основного полтавсько–харківського безнапірного водоносного горизонту

Зниження рівня (S), м	Орієнтовний (R), км	Площа зони впливу, км²
10	0,32	0,33
20	0,65	1,31
30	0,97	2,95
35	1,13	4,02

із фактичними даними експлуатації залізорудного кар'єру Хоуп-Даунс-Норт свідчить про співмірність масштабів гідрогеологічного впливу. Отриманий результат підтверджує реалістичність попередньої оцінки.

Особливо важливим питанням в дослідженнях є питання зміни напряму поверхневого та підземного стоку. Гідрографічна мережа території належить до басейну р. Дніпра. У районі родовища виділяються річки Конка, Жеребець, Гайчур і Верхня Терса. Безпосередньо в межах родовища постійні річки відсутні, а поверхневий стік формується переважно ярково-балковою мережею. У межах родовища присутні балки Гончариха, Солона, Різана, Попова, Шестипол'є та Кучерявська.

Морфометричне моделювання рельєфу показало, що до початку відкритої розробки (рис. 4, а) природний поверхневий стік спрямований у бік яружно-балкової мережі. Зокрема, потоки спрямовуються до балок Гончариха, Різана, Шестипол'є, Солона, Попова та Кучерявська.

Формування глибокої відкритої гірничої виробки принципово змінює морфологію рельєфу. Кар'єр стає новим локальним елементом рельєфу з абсолютними відмітками значно нижчими від прилеглої поверхні. Внаслідок цього змінюється напрям гідравлічного градієнта (рис. 4, б). За результатами наявного 3D-моделювання, при відкритій розробці потоки поверхневого стоку переорієнтовуються у бік кар'єрного простору. Цей процес має принципове природоохоронне значення. Кар'єр у такій ситуації фактично перетворюється на штучну область розвантаження поверхневого і підземного стоку. З одного боку, це забезпечує відведення води від робочої зони. З іншого – концентрація стоку збільшує обсяг води, який необхідно відводити з кар'єру, та підсилює залежність гірничого підприємства від системи водовідливу.

Особливо важливим є взаємозв'язок поверхневого і підземного стоку. За наявності гідравлічного зв'язку між водоносними горизонтами зниження рівня в одному горизонті може викликати перерозподіл потоків у суміжних горизонтах. Саме така ситуація можлива для полтавсько-харківського горизонту, який має гідравлічний зв'язок із нижчими водоносними комплексами.

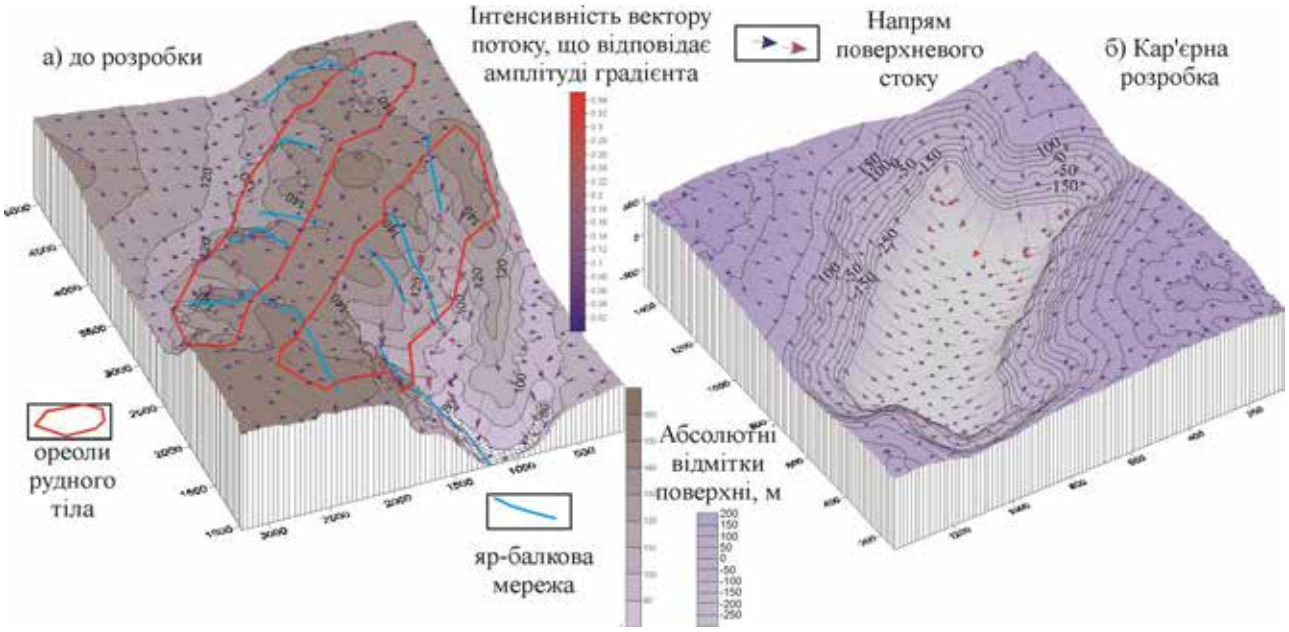


Рис. 4. Результат морфометричного моделювання рельєфу до початку відкритої розробки (а) та після формування глибокої відкритої гірничої виробки (б) з деталізацією напрямів гідравлічного градієнта (напрям поверхневого стоку)

Висновки. ГПР ЗК характеризується складними гідрогеологічними умовами, зумовленими наявністю декількох водоносних горизонтів і комплексів, різними фільтраційними властивостями порід та гідравлічним зв'язком між окремими водоносними системами. У межах родовища виділено сім основних водоносних горизонтів, серед яких найбільше значення для формування водоприпливу до кар'єру мають полтавсько-харківський горизонт, водоносні утворення кори вивітрювання та тріщинні води докембрійських кристалічних порід. Встановлено, що глибина кар'єру 400 м не може безпосередньо ототожнюватися з величиною зниження рівня підземних вод. Для основного полтавсько-харківського безнапірного горизонту, середня потужність якого прийнята на рівні близько 35 м, фізично обгрунтованим є розгляд величини зниження рівня в межах потужності водоносного горизонту. Такий підхід дозволяє уникнути завищення розрахункового масштабу депресійної лійки. За прийнятих середніх параметрів полтавсько-харківського горизонту попередня аналітична оцінка показала, що при зниженні рівня підземних вод на 10–35 м орієнтовний радіус локальної депресійної області становить близько 0,32–1,13 км, а її площа – приблизно 0,33–4,02 км². Отримані значення характеризують окремий водоносний горизонт і не можуть автоматично переноситися на всю багатопластову гідрогеологічну систему родовища. Встановлено, що попередня оцінка радіуса депресійної лійки 13,2 км, отримана при формальному прирівнюванні глибини кар'єру 400 м до величини зниження рівня підземних вод, не повинна використовуватися як достовірне прогнозне значення. Вона може бути наведена лише як демонстрація результату спрощеного сценарію. З урахуванням багатошарової будови водоносної системи та можливого гідравлічного зв'язку між полтавсько-харківським горизонтом, водами кори вивітрювання і тріщинними водами докембрійських порід реальна зона гідрогеологічного впливу може бути більшою за розраховану для одного водоносного горизонту. Тому остаточне визначення просторових меж депресійної лійки потребує побудови багатошарової чисельної моделі фільтрації з урахуванням просторової неоднорідності коефіцієнта фільтрації, водопровідності, гідравлічних зв'язків та умов живлення. Прогнозований водоприплив до кар'єру є суттєвим і може досягати порядку 1500 м³/год, що обумовлює необхідність проектування ефективної системи дренажу та водовідливу. При цьому водоприплив має розглядатися як змінний у часі параметр, залежний від глибини гірничих робіт, розкриття нових водоносних інтервалів, сезонного живлення та фільтраційних властивостей порід.

Аналіз рельєфу показав, що до початку відкритої розробки поверхневий стік території формується переважно в межах яружно-балкової мережі. Формування глибокої кар'єрної виїмки створить нову локальну негативну форму рельєфу та може спричиняти концентрацію поверхневого стоку в напрямку гірничої виробки. Встановлено, що гідрологічний і гідрогеологічний вплив кар'єру необхідно оцінювати комплексно. Зниження рівнів підземних вод може змінювати фільтраційні градієнти

та перерозподіляти потоки між взаємопов'язаними водоносними горизонтами, тоді як зміна рельєфу може переорієнтовувати поверхневий стік. Таким чином, формування кар'єру потенційно впливає одночасно на поверхневий і підземний компоненти водного балансу. Глибину 400 м доцільно розглядати як досліджувану та потенційно прийнятну межу відкритої розробки, за якої подальше поглиблення потребує додаткового гідрогеологічного, техніко-економічного та екологічного обґрунтування.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати можуть бути використані для гідрогеоекологічного обґрунтування параметрів відкритої розробки ГПР, зокрема для оцінювання водоприпливу, просторового розвитку депресійної лійки та зміни напрямів поверхневого і підземного стоку. Практичне застосування результатів полягає у виборі та обґрунтуванні раціональних параметрів гірничих робіт, проектуванні системи водовідливу й гідрогеологічного моніторингу.

Література

1. Улицький О. А. Д'яченко Н. О. Касьяненко Д. Л. Визначення впливу ймовірного технологічного чинника видобування залізорудних покладів на зміни екологогідрогеологічного середовища. *Екологічна безпека та технології захисту довкілля,* № 6,2024. – С. 38-49. https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202406-05.
2. Motyka J., d'Obyrn K. The radius of influence of mine drainage – Definitions, methods of determination, and practical issues. *Journal of Hydrology,* V. 613, Part A, 2022. – 128422, 10.1016/j.jhydrol.2022.128422.
3. Улицький О.А., Д'яченко Н.О., Касьяненко Д.Л. Збалансований підхід до видобутку залізних руд Гуляйпільського родовища в сучасних умовах. Екологічні науки, 2023. - 5(50). – С. 54-60. DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.5-50.8.
4. Улицький О. А., Д'яченко Н. О., Савлучинський О. М., Гайовий О. В. Оцінка потенційного впливу промислового видобутку залізистих кварцитів Гуляйпільського родовища на довкілля. *Гірнича геологія та геоекологія*, № 2, 2021. - С. 42-63.
5. Malieiev Ye.V., Levchenko K.S. Research of the impact of open-pit mining on the land and water resources in Kryvbas. *Геотехнічна механіка*. №. 162, 2022. – С. 135–143. https://doi.org/10.15407/geotm2022.162.135.
6. Швагер Н. Ю., Нестеренко, О. В. Вплив гідрогеології, водовідливу та осушення на стійкість порід, деградацію земель і рельєф Кривбасу. *Проблеми охорони праці в Україні*, 41 (3-4), 2025. – С. 31–36. https://doi.org/10.36804/nndipbop.41-3-4.2025.31-36.
7. Bozan, C., Wallis, I., Cook, P. G., & Dogramaci, S. Groundwater-level recovery following closure of open-pit mines. *Hydrogeology Journal*, 30(6), 2022. – P. 1819–1832. https://doi.org/10.1007/s10040-022-02508-2.
8. Cook P.G., Dogramaci S, McCallum J, Hedley J. Groundwater age, mixing and flow rates in the vicinity of large open pit mines, Pilbara region, northwestern Australia. *Hydrogeol*, 25(1), 2017. – P. 39–53. https://doi.org/10.1007/s10040-016-1467-y.
9. Cook P.G, Dogramaci S. Estimating recharge from recirculated groundwater with dissolved gases: an end-member mixing analysis. *Water Resources Research*, 55 (7), 2019. – P. 5468–5486. https://doi.org/10.1029/2019WR025012

Дата першого надходження статті до видання: 27.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

ЕКОЛОГІЯ ВОДНИХ РЕСУРСІВ

УДК 504.4.062.2:628.112.24(477.86/.87)
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.18

ТРАНСКОРДОННІ АСПЕКТИ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ВОДОПОСТАЧАННЯ З ІНФІЛЬТРАЦІЙНИХ ВОДОЗАБОРІВ У БАСЕЙНІ ПРУТУ І СІРЕТУ

Григорійчук В.В. (orcid.org/0000-0002-8875-4354),
Пасічник М.Д. (orcid.org/0000-0001-9378-6302)
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича
вул. Коцюбинського, 2, 58012, м. Чернівці
v.hryhoriychuk@chnu.edu.ua, m.pasichnyk@chnu.edu.ua

Стаття присвячена обґрунтуванню методологічного підходу до оцінювання екологічної безпеки систем питного водопостачання, що базуються на інфільтраційних водозаборах, у транскордонному басейні річок Прут та Сірет (Україна – Румунія – Республіка Молдова), у межах південно-східного Передкарпаття. Розглянуто природні передумови формування ресурсів інфільтраційних підземних вод: гірський і передгірний характер русел Пруту та Сірету, фракційний склад алювіальних відкладів, що визначає їхню високу фільтраційну здатність і тісний гідравлічний зв'язок підземних вод з річковим стоком. Виявлено та систематизовано ключові чинники екологічного ризику для якості й надійності водопостачання з інфільтраційних споруд: антропогенне навантаження в басейні (промисловість, сільське господарство, урбанізація за участі близько мільйона мешканців), дифузне та точкове забруднення поверхневого стоку, порушення гідроморфологічного режиму річок штучними бар'єрами, паводковий режим і його інтенсифікацію в умовах кліматичних змін, а також транскордонне перенесення забруднювальних речовин. Проаналізовано інституційно-правові засади українсько-румунського співробітництва у сфері охорони транскордонних вод, зокрема Угоду 1997 р. про співробітництво в галузі водного господарства на прикордонних водах, діяльність робочої групи з басейнів Прута і Сірету, Басейнової ради Пруту та Сірету, а також інтеграцію Плану управління суббасейнами Пруту та Сірету у структуру Плану управління річковим басейном Дунаю на 2025–2030 роки відповідно до вимог Водної рамкової директиви ЄС. Запропоновано методичний підхід до комплексної оцінки екологічної безпеки інфільтраційних водозаборів на основі індикаторної рамки DPSIR (рушійні сили – тиск – стан – вплив – реагування), адаптованої до специфіки транскордонного водокористування. Обґрунтовано напрями вдосконалення спільного моніторингу, узгодження водоохоронних заходів і впровадження систем раннього попередження про аварійне забруднення для підвищення надійності питного водопостачання населення Прикарпаття і Буковини. *Ключові слова:* інфільтраційні водозабори, екологічна безпека, водозбір, річковий басейн, транскордонне співробітництво, DPSIR.

Transboundary Aspects of the Environmental Safety of Water Supply from Infiltration Intakes in the Prut and Siret River Basin. Hryhoriichuk V., Pasichnyk M.

The article substantiates a methodological approach to assessing the environmental safety of drinking water supply systems based on riverbank filtration intakes within the transboundary Prut and Siret River Basin (Ukraine–Romania–Republic of Moldova) in the Southeastern Pre-Carpathian region. The study examines the natural conditions controlling the formation of bank-filtered groundwater resources, including the mountainous and foothill character of the Prut and Siret river channels and the boulder-pebble and sandy-gravel composition of the alluvial deposits, which provide high hydraulic conductivity and ensure a close hydraulic connection between groundwater and river flow. The principal environmental risk factors affecting the quality and reliability of bank filtration systems are identified and systematized, including anthropogenic pressure within the basin (industry, agriculture, and urban development involving approximately one million inhabitants), diffuse and point-source pollution of surface runoff, hydromorphological alterations caused by artificial barriers, flood regimes and their intensification under climate change, as well as the transboundary transport of pollutants. The institutional and legal framework governing Ukrainian–Romanian cooperation in the field of transboundary water protection is analysed, with particular attention to the 1997 Agreement on Cooperation in the Field of Water Management on Boundary Waters, the activities of the Prut and Siret River Basins Working Group and the Prut and Siret Basin Council, and the integration of the Prut and Siret Sub-basin Management Plan into the Danube River Basin Management Plan for 2025–2030 in accordance with the requirements of the EU Water Framework Directive. A methodological approach to the integrated assessment of the environmental safety of bank filtration water intakes is proposed based on the DPSIR framework (Drivers–Pressures–State–Impacts–Responses), adapted to the specific conditions of transboundary water management. The study substantiates priority directions for improving joint monitoring, harmonising water protection measures, and implementing early warning systems for accidental pollution in order to enhance the reliability of drinking water supply for the population of the Pre-Carpathian region and Bukovyna. *Key words:* infiltration water intakes, ecological safety, catchment, river basin, transboundary cooperation, DPSIR.

© Григорійчук В.В., Пасічник М.Д., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. Питне водопостачання – одне з головних завдань організації населених місць по всьому світу. Надійна та безперебійна подача питної води, без сумніву, постійно займає значну частину витрат комунальних підприємств, однак не слід випускати з уваги вплив кожної з окремих складових систем водопостачання як всередині неї, так і на загальний екологічний стан суміжних територій. Зрозуміло, що вплив водотоків у суміжних регіонах визначає і їхню взаємодію в екологічному контексті. Так, якщо скид стічних вод має безпосередній вплив на течію водотоку нижче населених пунктів, то відбір води джерелами комунального питного водопостачання – відтермінований у часі. Саме тому екологічна політика держав басейну Дунаю значно зорієнтована на питне водопостачання прикордонних територій. З іншого боку, на південно-східному Передкарпатті – в межах Івано-Франківської та Чернівецької областей – склалася доволі тривала практика використання інфільтраційних водозаборів. Ці споруди за принципом дії призначені для відбору води з алювіальних відкладів річкових долин Пруту, Сірету та їхніх допливів. Технологія берегової інфільтрації забезпечує природне доочищення річкової води від завислих речовин, органічних домішок, мікробіологічного забруднення. Відповідно, це відносно економічно й екологічно привабливa альтернатива щодо джерел поверхневих вод та безпосереднього водозабору з них.

Водночас басейн річок Прут і Сірет є транскордонним: він охоплює території України, Румунії та Республіки Молдова, а стан водних ресурсів у його межах формується під впливом господарської діяльності, що ведеться обабіч державного кордону. Отже, це зумовлює специфічну особливість екологічної безпеки інфільтраційних водозаборів регіону – її неможливо забезпечити виключно національними заходами, оскільки якість та режим річкового стоку, який живить прибережні водоносні горизонти, значною мірою залежать від процесів, що відбуваються за межами України. Знову ж таки водовикористання у верхів'ях річок значно впливає на формування екологічної ситуації на нижніх ділянках. Відповідно, актуальності набуває дослідження екологічної безпеки водопостачання з інфільтраційних водозаборів саме у транскордонному вимірі – з урахуванням природних, техногенних та інституційних чинників.

Актуальність проблеми. Інфільтраційних водозабори доволі поширений тип споруд на території південно-східного Передкарпаття. Вони часто є найдоступнішим з економічного погляду способом централізованого водопостачання багатьох населених пунктів Івано-Франківської та Чернівецької областей, розташованих у долинах Пруту, Сірету та їхніх приток. Будь-яке погіршення екологічного стану цих річок безпосередньо позначається на надійності забезпечення населення якісною питною водою, що надає проблемі не лише природоохоронного, а й соціального та санітарно-епідеміологічного характеру.

Вразливість інфільтраційних водозаборів до гідроекологічних змін підтверджується й нещодавньою практикою: у червні 2023 року через інтенсивні зливові опади та різке підняття рівня й каламутності води в р. Прут міські інфільтраційні водозабори, що забезпечували питною водою близько третини м. Чернівці, тимчасово припинили роботу, і місто вимушено перейшло повністю на водопостачання з р. Дністер. Цей випадок підтверджує, що екологічна безпека інфільтраційних водозабірних споруд є поточною проблемою, чутливою до гідрометеорологічних екстремумів, повторюваність та інтенсивність яких, за загальними оцінками, зростає в умовах кліматичних змін.

Додаткової актуальності дослідженню надає транскордонний статус басейну Пруту і Сірету: річковий сток формується на території кількох держав, забезпечення екологічної безпеки водопостачання не може розглядатися окремо в національних межах і потребує узгоджених міждержавних підходів до моніторингу та управління ризиками.

Слід також зазначити, що, попри значний масив наукових праць, присвячених гідроморфології, руслоформуванню та антропогенній трансформації річкових ландшафтів Пруту і Сірету, спеціалізовані дослідження екологічної безпеки саме інфільтраційних водозаборів у транскордонному контексті залишаються нечисленними, а системна індикаторна методика оцінки такої безпеки для умов Південно-Східного Передкарпаття наразі не розроблена.

Зв'язок авторського доробку з важливими науковими та практичними завданнями. Результати мають важливе значення для вирішення практичних завдань у сфері управління водними ресурсами, зокрема для аналізу зміни водності річок у зоні впливу інфільтраційних водозаборів, зокрема з системами штучного поповнення запасів підземних вод, підвищення ефективності функціонування споруд та узагальнення досвіду використання окремого типу водозаборів з погляду зростання антропогенного навантаження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Традиційно вчені досліджують водні ресурси Карпатського регіону. Значна кількість праць присвячена особливостям використання водних ресурсів річок басейну Прута і Сірету. Свого часу проф. М. І. Кирилюк у своїй останній праці [1] наголошував на невичерпності запасів руслових вод і їхній високій самоочисній здатності порівняно з підземними водами. Праці науковців Чернівецького національного університету, підкреслюють сприятливі умови на використанні в умовах Передкарпаття водозаборів інфільтраційного типу, оскільки алювіальні долини тут дуже розвинені [2;3;4].

Формування ресурсів інфільтраційних підземних вод традиційно розглядається в гідрогеологічних

працях з погляду інфільтраційної теорії походження підземних вод. Європейські та американські вчені заклали ґрунтовну основу для вивчення інфільтраційних споруд для різних випадків [5;6;7;8]. Стосовно Карпатського регіону встановлено, що основні експлуатовані водозабори, приурочені до валунно-галечникових відкладів долин гірських річок, за своєю природою є інфільтраційними, оскільки гідравлічно тісно пов'язані з річковим стоком [2;9].

Оскільки Україна приводить власне законодавство до вимог ЄС, постає низка завдань і щодо водного господарства. Особливості цього процесу знайшли відображення в дослідженнях як з погляду адміністративного, так і водоохоронного законодавства [10].

Значна частина праць присвячена удосконаленню басейнового підходу та його інструментів для впровадження на практиці [11;12], що надзвичайно важливо з погляду сталого розвитку територій, зокрема у час воєнного стану.

Офіційні планувальні документи [13;14] державного водогосподарського управління – проєкт Плану управління суббасейном річок Прут та Сірет на 2025–2030 роки та затверджений розпорядженням Кабінету Міністрів України План управління річковим басейном Дунаю на 2025–2030 роки – містять систематизовані відомості про гідрографічні, кліматичні та водогосподарські характеристики суббасейнів Пруту і Сірету, включно з переліком масивів поверхневих вод і програмами заходів щодо зменшення забруднення. Ці документи розроблено відповідно до вимог Водної рамкової директиви ЄС (2000/60/ЄС) [15], отже вони основні для узгодження водоохоронних дій у транскордонному контексті.

Окрема галузь досліджень – вивчення малих річок басейну Пруту і Сірету, що дозволяє формувати значний пласт даних, відповідно підвищувати ефективність використання водних ресурсів у регіоні.

Однак, спеціальні дослідження, які б поєднували природничо-гідрогеологічну характеристику інфільтраційних водозаборів південно-східного Передкарпаття з аналізом транскордонних інституційних механізмів і пропонували системну методику оцінки екологічної безпеки саме таких систем водопостачання, наразі практично відсутні. Це зумовлює доцільність цієї роботи.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Серед публікацій, що присвячені вивченню транскордонних особливостей водних об'єктів Передкарпаття дуже мало уваги звертається на функціонування водозаборів, а особливо інфільтраційного типу, які доволі поширені на території дослідження. Нагальною постає потреба в дослідженнях та аналізі можливостей попередження аварійних наслідків антропогенного впливу як для окремого взятого водозабору чи населеного пункту, так і для цілого регіону.

Новизна. У дослідженні надані рекомендації щодо оцінювання екологічної безпеки водозабірних споруд інфільтраційного типу. Це має важливе значення для розвитку гідрології екології, а також для формування наукових основ раціонального використання і охорони водних ресурсів.

Методологічне значення. Інформаційною базою дослідження є офіційні планувальні документи Державного агентства водних ресурсів України, а також публікації щодо гідроекологічного стану басейну. Застосовано методи порівняльного аналізу механізмів транскордонного співробітництва, а також системний підхід, реалізований через адаптацію індикаторної рамки DPSIR (Driving forces – Pressures – State – Impact – Response) до специфіки оцінювання екологічної безпеки інфільтраційних водозаборів.

Викладення основного матеріалу. Транскордонний суббасейн Пруту охоплює території Івано-Франківської та Чернівецької областей України, а також частину території Румунії та Республіки Молдова. Загальна довжина річки Прут становить 967 км, з них 299 км припадає на територію України; площа водозбору – 27540 км², з яких у межах України – 8849 км². Карпатські притоки Пруту є гірськими річками зі значними ухилами, скелясто-валунним і галечниковим ложем та малопроникними підстильними ґрунтами, що за умов високої вологості повітря і частих зливових опадів зумовлює характерний для Пруту паводковий режим із повторюваними зливовими паводками.

Транскордонний суббасейн Сірету охоплює територію Чернівецької області України та Румунії. Довжина річки в межах України становить близько 100 км, площа водозбору – понад 44 тис. км² (у межах України – 2070 км²). У верхів'ях Сірет має виражено гірський характер із глибокою долиною, терасами й заплавами, у нижній течії набуває передгірно-рівнинного характеру; русло складене галькою, глиною, суглинками та піском. Живлення суббасейну Сірету – снігове і дощове, з паводковим режимом стоку впродовж року.

Саме фракційний склад алювіальних відкладів долин Пруту, Сірету та їхніх допливів створює сприятливі гідрогеологічні умови для застосування інфільтраційних водозаборів, оскільки висока водопроникність порід забезпечує інтенсивний і водночас природно фільтрований водообмін між річковим стоком і прибережними водоносними горизонтами. Практика влаштування водозабірних споруд для водопостачання населених пунктів регіону у долинах гірських і передгірних річок, приурочених до відповідних алювіальних горизонтів, підтверджує викладене, зокрема аналізом діючих водозабірних пристроїв. Так, саме інфільтраційний типу водозабору застосований у системах централізованого водопроводу міст Вижниця, Долина, Коломия, Надвірна, Снятин, Чернівці, Яремче, а також селищ Вашківці, Глибока та Заболотів.

Дуже важливо з погляду транскордонного впливу, що інфільтраційні споруди не чинять прямого впливу на відбір води безпосередньо з русла, оскільки взаємодіють з підрусловим потоком, а це дуже сприятливо впливає на рівномірність водного режиму. Не менш важливою перевагою таких систем є те, що вони (за належних природних умов) значно дешевші та екологічніші, адже, наприклад, взагалі не порушують життєдіяльність водної фауни та флори. Так, якщо на поверхневих водозаборах дуже часто нехтують рибозахисними заходами, то на інфільтраційних, саме відбір води з прилеглого до русла потоку в алювіальних відкладах унеможливлює будь-яке перешкоджання руху риб чи загрозу механічного впливу на них.

Деяким винятком, можна вважати ті інфільтраційні водозабори, які обладнані системами штучного поповнення запасів підземних вод. Принцип роботи цих споруд полягає в подачі (природній або примусовій) на інфільтраційні споруди природного чи штучного походження поверхневих вод з прилеглого водотоку. Одначе і тут вплив на екосистеми значно м'якший, аніж у пристроїв безпосереднього забору води. Наприклад, під час паводків, забір води не здійснюється взагалі, зберігаючи доволі тривалу (в місяцях) продуктивність без значного зниження подачі. Цього досягають за рахунок високої акумуляційної здатності алювіальних відкладів і додаткових заходів, як-от озер природного (станція «Біла» м.Чернівці) і штучного (водозабір м.Коломия, станції «Магала», «Очерет» м.Чернівці) походження, створення спеціальних умов забору води з русла (ковшовий водозабір м.Коломия, деривацій-ний канал споруд м.Яремче) тощо. При цьому, таке рішення значно підвищує продуктивність системи, що особливо важливо для невеликих міст, які мають належні площі для розширення.

Прямий гідравлічний зв'язок інфільтраційних водозаборів з річковим стоком, що є їхньою перевагою, водночас обумовлює деяку їхню вразливість до погіршення якості поверхневих вод. У басейні Пруту і Сірету, попри переважання гірської та передгірної частини водозбору в межах Українських Карпат, спостерігається відчутне зростання антропогенного навантаження, зумовлене, як підвищенням рівня благоустрою та зростання кількості синтетичних забрудників, так і непрямим впливом наслідків внаслідок нападу російської федерації. Це створює передумови для розосередженого (сільськогосподарський стік, неорганізовані скиди) та точкового (комунальні й промислові випуски) забруднення поверхневих вод органічними й біогенними речовинами.

По-друге, порушення гідрологічного режиму русел – наявність штучних перепон (гребель, засмічення), які перешкоджають природній течії, змінюють режим наносів і можуть впливати на умови інфільтрації. Проблеми такого характеру є, і мають бути в полі зору міжнародних проєктів з відновлення допливів Дунаю, що дозволить спільно підвищувати можливості усунення наслідків шкідливого впливу у басейні Пруту й Сірету.

По-третє – паводковий режим річок, характерний для Пруту (часті зливові паводки) і Сірету (паводки впродовж усього року), інтенсивність якого, за загальними оцінками, має тенденцію до зростання в умовах кліматичних змін. Проходження високих паводкових хвиль підвищує ризик короткочасного різкого погіршення якості річкової води (мутність, органічне забруднення, можливе змивання забруднювальних речовин із заплави) і, відповідно, тимчасового навантаження на систему природної фільтрації інфільтраційних водозаборів.

Четвертий, особливо важливий транскордонний фактор – можливість перенесення забруднення через державний кордон. Це унеможливлює забезпечення екологічної безпеки водопостачання суто національними засобами і потребує узгоджених дій усіх прибережних держав.

Правовою основою українсько-румунської співпраці з охорони прикордонних вод є Угода між Урядом України та Урядом Румунії про співробітництво в галузі водного господарства на прикордонних водах, підписана 30 вересня 1997 року в м. Галац. Така взаємодія забезпечує регулярний обмін інформацією та узгодження водогосподарських і природоохоронних заходів.

На стратегічному рівні План управління суббасейнами Пруту та Сірету на 2025–2030 роки інтегровано до Плану управління річковим басейном Дунаю, затвердженого розпорядженням Кабінету Міністрів України від 31 грудня 2024 року № 1347, що розроблено відповідно до вимог Водної рамкової директиви ЄС. У межах суббасейнів Пруту та Сірету за відповідною методикою виокремлено масиви поверхневих вод і передбачено програми заходів, спрямованих, зокрема, на зменшення забруднення органічними й біогенними речовинами та відновлення гідрологічного й гідроморфологічного режиму водних об'єктів. Це створює формальну основу для узгодження національних водоохоронних заходів із загальноєвропейськими підходами, однак наразі ця основа не деталізована стосовно специфічних вимог до екологічної безпеки саме інфільтраційних водозаборів як особливого типу об'єктів для питного водопостачання.

З огляду на визначені умови, потрібно структурувати комплексну оцінку екологічної безпеки інфільтраційних водозаборів басейну Пруту і Сірету за індикаторною рамкою DPSIR, адаптованою до транскордонного контексту:

– рушійні сили (Driving forces): демографічне навантаження на басейн, структура землекористування та господарської діяльності (сільське господарство, промисловість, енергетика, урбанізація) обабіч кордону;

– тиск (Pressures): обсяги й структура скидів стічних вод, дифузне забруднення від сільськогосподарських угідь, наявність гідроморфологічних бар'єрів, обсяги водозабору для інфільтраційних систем;

– стан (State): гідрохімічні й мікробіологічні показники якості річкової та інфільтраційної (підземної) води в зоні впливу водозаборів, режим рівнів і витрат річок, стан визначених масивів поверхневих вод суббасейнів Пруту та Сірету;

– вплив (Impact): ризики для здоров'я населення, що споживає воду з інфільтраційних водозаборів, стан водних екосистем і біорізноманіття (зокрема мігруючих та зникаючих видів риб басейну);

– реагування (Response): спільний транскордонний моніторинг, узгоджені програми водоохоронних заходів у межах планів управління річковими басейнами, санітарно-захисні зони водозаборів, системи раннього попередження про аварійне забруднення.

Особливої уваги в межах блоку «реагування» заслуговує використання власне часу фільтраційного руху води від річища до водозабірної свердловини як технологічного резерву для раннього попередження: за умови узгодженого транскордонного моніторингу якості річкової води вище за течією цей інтервал часу може бути використаний для оперативного інформування підприємств-надавачів послуг з водопостачання про наближення забрудненої водної маси та вжиття превентивних заходів (тимчасове зниження продуктивності водозабору, посилений контроль якості). До слова, в Державних будівельних нормах України наведені основні рекомендації, щодо розрахунку відстані у подібних ситуаціях. Реалізація такого підходу потребує узгодження підходів до моніторингу між зацікавленими сторонами, а також визначення чітких протоколів обміну оперативною інформацією в межах уже наявних робочих груп і Басейнової ради Пруту та Сірету.

Запропонована методична рамка має стати основою для подальшого емпіричного етапу дослідження, який передбачає збір і аналіз натурних гідрохімічних, гідрогеологічних та санітарно-епідеміологічних даних по конкретних інфільтраційних водозаборах Південно-Східного Передкарпаття (особливо водозабірних споруд м.Чернівці та селища Глибока).

Головні висновки. Проведений аналіз показав, що екологічна безпека водопостачання з інфільтраційних водозаборів у басейні річок Прут і Сірет визначається поєднанням сприятливих природних гідрогеологічних умов південно-східного Передкарпаття та комплексу ризиків, притаманних транскордонному й антропогенно навантаженому водозбору.

Чинна інституційно-правова база українсько-румунського співробітництва формує потрібну, проте недостатню основу для забезпечення екологічної безпеки саме інфільтраційних водозаборів: наразі відсутні деталізовані узгоджені вимоги та індикатори, орієнтовані на специфіку цього типу водозабірних споруд.

Перспективи використання результатів дослідження.

Запропонований методичний підхід на основі індикаторної рамки DPSIR, адаптованої до транскордонного контексту, дає змогу системно структурувати оцінку екологічної безпеки власне інфільтраційних водозаборів і визначає перспективний напрям практичного використання тривалості фільтраційного руху води як інструменту раннього попередження. Подальші дослідження належить спрямувати на емпіричну апробацію запропонованої методики на конкретних спорудах південно-східного Передкарпаття з використанням натурних гідрохімічних і гідрогеологічних даних, а також узгодження протоколів обміну моніторинговою інформацією.

Література

1. Кирилюк М. І. Основи раціонального природокористування та охорони природи. – Чернівці : Чернівецький нац. ун-т ім. Ю. Федьковича, 2012. 352 с.
2. Гідроекологічне обгрунтування безпечного та збалансованого розвитку річкових природно-антропогенних систем Передкарпаття : монографія / Ющенко Ю.С. та ін.; за ред. Ю.С. Ющенка. – Чернівці : Чернівецький нац. ун-т ім. Ю. Федьковича, 2017. 472 с.
3. Григорійчук В. В. Особливості функціонування берегових інфільтраційних водозаборів на річках південно-східного Передкарпаття. Природнича освіта та наука. 2026. (1). С. 216-221.
4. Григорійчук В. В. Регіональні особливості використання інфільтраційних водозаборів у Івано-Франківській області. Науковий вісник Чернівецького університету : Географія. 2013. (655). С. 23-26. https://doi.org/10.32782/NSER/2026-1.31
5. Management of Aquifer Recharge for Sustainability: Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, September 2002. Edited by P.J. Dillon. CRC Press, 2020. 580 p.
6. Riverbank Filtration. Improving Source-Water Quality. Edited by Ray Ch., Melin G., Linsky R. B. Water Science and Technology Library. 2003. Vol. 43. 366 p. https://doi.org/10.1007/0-306-48154-5
7. Schmidt C. K., Lange F. Th., Brauch H.-J., Kühn W. Experiences with riverbank filtration and infiltration in Germany. DVGW-Water Technology Center (TZW), Karlsruhe, 2003. 17 p.
8. Wiese B., Nützmann G. Transient Leakance and Infiltration Characteristics during Lake Bank Filtration. *Groundwater*. 2009. Vol.47 (1), p. 57-68. https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2008.00510.x.
9. Кілінська К., Ющенко Ю., Смик О., Єремія Г. Гідрогеоморфологічні характеристики транскордонних річок Карпатського регіону (на прикладі території України). Науковий вісник ЧНУ: Географія. 2020. Вип. 824. С. 4–8.
10. Сапко О. Ю. Стан впровадження вимог європейського законодавства щодо охорони і раціонального використання водних ресурсів в України. Екологічні науки. 2024. № 6 (57). С. 83–88. URL: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.6-57.12.

11. Заячук М. Д., Пасічник М. Д., Заячук О. В. До питання реалізації заходів плану управління річковими суббасейнами Пруту і Сірету та спроможності територіальних громад. Науковий вісник Чернівецького університету: Географія. 2024. Вип. 849. С. 96–105. https://doi.org/10.31861/geo.2024.849.96-105
12. Климчик О. М., Пінкіна Т. В., Пінкін А. А. Впровадження системи інтегрованого управління водними ресурсами за басейновим принципом. ScienceRise. 2018. № 4 (45). С. 33–38. https://doi.org/10.15587/2313-8416.2018.129789
13. Проєкт Плану управління суббасейном річок Прут та Сірет (2025–2030) / Держводагентство України. 2022. 65 с. URL: davr.gov.ua/fls18/PrutSiret_1-11.pdf
14. План управління річковим басейном Дунаю (2025–2030), затв. розпорядженням КМУ від 31.12.2024 № 1347. 771 с. URL: davr.gov.ua/fls18/PURB_Dunay.pdf
15. Директива 2000/60/ЄС Європейського Парламенту та Ради «Про встановлення рамок діяльності Співтовариства в галузі водної політики» від 23 жовтня 2000 року. Official Journal of the European Communities. 2000. L 327. P. 1–73.

Дата першого надходження статті до видання: 17.07.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

УДК 504.4:556.53:626.81:502.17:551.583
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.19

ПОРІВНЯННЯ СЦЕНАРІЇВ ЗМЕНШЕННЯ НАВАНТАЖЕННЯ НА РІЧКИ ХАДЖИДЕР І АЛКАЛІЯ МЕТОДОМ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО ОЦІНЮВАННЯ

Дрозд О.М.[1] (orcid.org/0000-0003-4856-8589),
Дядін Д.В.[2] (orcid.org/0000-0003-3421-3592)
[1]Estación Experimental de Aula Dei, EEAD-CSIC
Avenida Montañana 1005, 50059, Zaragoza, España
[2]Інститут водних проблем і меліорації Національної академії аграрних наук України
вул. Васильківська, 37, 03022, м. Київ
odrozd@eead.csic.es, dmdyadin@gmail.com

Посилення посушливості клімату й нестійкості природного зволоження актуалізує відновлення зрошення як умову стабілізації сільськогосподарського виробництва та забезпечення продовольчої безпеки держави. Водночас виконання природоохоронних зобов'язань України потребує збереження біорізноманіття і водозалежних екосистем. Для малих річок ризики формуються внаслідок водозабору, зарегулювання стоку, високої розораності водозборів, порушення прибережних захисних смуг, надходження ерозійного і дренажного стоку, поживних речовин та засобів захисту рослин. Кумулятивний характер цих впливів зумовлює необхідність комплексного порівняння водогосподарських, агроекологічних і природоохоронних заходів. Метою дослідження було сформувати та порівняти альтернативні сценарії зменшення навантаження на річки Хаджидер і Алкалія та пов'язані з ними водозалежні екосистеми НПП «Тузловські лимани». Застосовано адаптований підхід до багатокритеріального оцінювання, що поєднував системний опис території, структурний аналіз взаємовпливів, експертне визначення пріоритетності заходів, оцінювання корисності сценаріїв і аналіз чутливості. Провідними чинниками трансформації системи визначено високу частку орних земель, зміни й регулювання річкового стоку, кліматично зумовлений дефіцит води та поверхневий водозабір. Найбільшу залежність від сукупного впливу виявлено для водного біорізноманіття малих річок і біорізноманіття охоронюваних лиманів. Для порівняння сформовано водогосподарський, агроекологічний та інтегрований сценарії. Найвищу інтегральну корисність отримав інтегрований сценарій, пріоритетність якого зберігалася під час аналізу чутливості. Результати мають експертно-сценарний характер і можуть бути використані для визначення пріоритетів відновлення малих річок, екологічно орієнтованого планування зрошення та обґрунтування обмежень господарської діяльності на територіях, прилеглих або гідрологічно пов'язаних з об'єктами природно-заповідного фонду і територіями Смарагдової мережі. *Ключові слова:* малі річки, зрошуване землеробство, зміна клімату, водозалежні екосистеми, багатокритеріальне оцінювання.

Comparison of scenarios for reducing pressures on the Khadzhyder and Alkaliia Rivers using multi-criteria decision analysis. Drozd O., Diadin D.

Increasing climate aridity and the growing variability of natural moisture availability have made the restoration of irrigation increasingly important for stabilising agricultural production and safeguarding Ukraine's food security. At the same time, meeting the country's environmental commitments requires the conservation of biodiversity and water-dependent ecosystems. Small rivers are affected by water abstraction, flow regulation, the high proportion of cropland within their catchments, degradation of riparian protection zones, and inputs of erosion and drainage runoff, nutrients, and crop protection products. The cumulative nature of these pressures highlights the need for an integrated comparison of water-management, agroecological, and conservation measures. This study aimed to develop and compare alternative scenarios for reducing pressures on the Khadzhyder and Alkaliia Rivers and the associated water-dependent ecosystems of Tuzlovski Lymany National Nature Park. An adapted multi-criteria assessment approach was applied, combining a systems-based description of the study area, structural analysis of interactions among system components, expert prioritisation of measures, utility-based scenario assessment, and sensitivity analysis. The principal drivers of system transformation were identified as the high proportion of cropland, changes in and regulation of river flow, climate-induced water scarcity, and surface water abstraction. Aquatic biodiversity in small rivers and biodiversity in protected lagoons were found to be the components most dependent on cumulative system pressures. Three alternatives were compared: a water-management scenario, an agroecological scenario, and an integrated scenario. The integrated scenario achieved the highest overall utility and remained the top-ranked alternative during sensitivity analysis. The results are expert- and scenario-based and therefore represent a relative ranking of alternatives under the adopted assumptions. The proposed approach can support the prioritisation of small-river restoration measures, environmentally responsible irrigation planning, and the justification of restrictions on economic activities in areas adjacent to or hydrologically connected with protected areas within Ukraine's Nature Reserve Fund and Emerald Network sites. *Key words:* small rivers, irrigated agriculture, climate change, water-dependent ecosystems, multi-criteria assessment.

Постановка проблеми. Південь України характеризується поєднанням інтенсивного сільськогосподарського використання території з наявністю великих водно-болотних комплексів міжнародного значення. Дефіцит природного зволоження обмежує продуктивність землеробства та зумовлює потребу

© Дрозд О.М., Дядін Д.В., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

у розвитку зрошення, тоді як інтенсифікація сільськогосподарського виробництва, зміни землекористування і водного режиму можуть посилювати навантаження на малі річки та пов'язані з ними водозалежні екосистеми. За таких умов постає науково-практична проблема узгодження аграрного розвитку і водогосподарської діяльності із завданнями збереження природного біорізноманіття.

Національний природний парк «Тузловські лимани» охоплює один із найцінніших природних комплексів Північно-Західного Причорномор'я. Система лиманів Шагани – Алібей – Бурнас має статус водно-болотного угіддя міжнародного значення та виконує важливі функції збереження водоплавних і навколоводних птахів, гідробіонтів і прибережних оселищ [1, 2]. Річки Хаджидер і Алкалія гідрологічно пов'язані з лиманною системою парку. Їхні пониззя сполучені із системою лиманів Хаджидер, Алібей, Солоний і Бурнас, а пригирлові ділянки належать до комплексу природних і трансформованих водотоків НПП «Тузловські лимани» [3]. Для цих малих річок характерні виражена сезонна мінливість стоку, тривалі маловодні періоди та переривчастість водного режиму. Навіть епізодичний річковий приплив впливає на водний і сольовий баланс пригирлових ділянок, їх кисневий і трофічний режими, надходження до лиманів розчинених і завислих речовин.

Уразливість цієї системи посилюється в умовах зміни клімату. Розрахунки водного балансу квазізакритих лиманів Північно-Західного Причорномор'я засвідчують збільшення дефіциту прісної води та дають підстави віднести Тузловську групу до водойм, чутливих до скорочення стоку з водозборів [4]. Поєднання зростаючого випаровування зі зменшенням річкового припливу підвищує ризики обміління й осолонення лиманів та подальшої трансформації водозалежних біотопів.

Хаджидер і Алкалія є транскордонними річками, тому частина їхнього стоку та антропогенного навантаження формується на території Республіки Молдова [10]. У межах української частини водозборів обсяги надходження води до лиманів залежать від зарегулювання русел, наявності ставків і дамб, місцевих водозаборів та загальної трансформації території. Якість води визначається структурою землекористування, розораністю водозборів, станом прибережних захисних смуг, застосуванням добрив і засобів захисту рослин з прилеглих сільськогосподарських угідь, а також надходженням ерозійного, дренажного і забрудненого поверхневого стоку. Отже, стан водозалежних екосистем НПП формується під сукупним впливом зміни клімату, сільськогосподарського навантаження та водогосподарського регулювання у межах усього річкового басейну.

За таких умов основна науково-практична проблема полягає у визначенні такого поєднання водогосподарських, агроекологічних і природоохоронних заходів, яке сприятиме зменшенню сукупного навантаження на малі річки та пов'язані з ними водозалежні екосистеми в умовах інтенсивного сільськогосподарського використання територій.

Актуальність дослідження. Відновлення зрошення належить до стратегічних напрямів розвитку сільського господарства України в умовах посилення посушливості клімату та нестійкості природного зволоження. Стратегія зрошення та дренажу до 2030 року і план заходів з її реалізації передбачають модернізацію наявних і будівництво нових меліоративних систем, підвищення ефективності водокористування та розвиток організацій водокористувачів [5, 6]. Ці завдання узгоджуються з положеннями Водної стратегії України до 2050 року [7] та конкретизуються Довгостроковим планом розвитку іригаційного комплексу України до 2050 року [8].

Одеська область є одним із регіонів практичної реалізації реформи меліорації. Тут створюються організації водокористувачів, обговорюється реконструкція Ізмаїльської, Татарбунарської та Нагірнянської зрошувальних систем, реалізуються пілотні проєкти водо- й енергоефективного зрошення. Основними джерелами води для регіональних зрошувальних систем є Дунай, Дністер, придунайські озера та пов'язані з ними водосховища і канали [9, 10]. Річки Хаджидер і Алкалія не належать до основних джерел великомасштабного зрошення, однак стан їхніх екосистем залежить від місцевих водозаборів, регулювання стоку ставками і дамбами, трансформації землекористування та кумулятивного впливу сільськогосподарської діяльності в межах водозборів.

Водночас державна екологічна політика передбачає розширення природоохоронних територій, відновлення деградованих екосистем та інтеграцію вимог збереження біорізноманіття у секторальне планування. Законом України «Про основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року» встановлено ціль збільшення площі природно-заповідного фонду до 15 % території держави [11]. Стратегією збереження біологічного різноманіття України до 2035 року визначено завдання щодо збереження природних оселищ, відновлення деградованих екосистем і врахування природоохоронних вимог у процесі прийняття секторальних рішень [12]. Стратегія біорізноманіття ЄС до 2030 року передбачає правову охорону щонайменше 30 % суходолу та 30 % морських акваторій ЄС [13], що визначає загальний напрям наближення національної природоохоронної політики до європейських підходів.

Територія UA0000140 Tuzlovski Lymany National Nature Park площею 27 778 га входить до офіційно затверджених територій Смарагдової мережі [14]. Водночас долини річок Хаджидер і Алкалія охоплені нею лише частково. Для збереження природних комплексів цих річкових долин у науковому «тіньовому списку» обґрунтовано територію

UA0000577 Khadzhider–Alkalia площею 8 258,19 га [15], яка наразі не має офіційного статусу території Смарагдової мережі. Це посилює необхідність урахування екологічної цінності не лише території парку, а й суміжних ділянок водозборів, від стану яких залежить функціонування його водозалежних екосистем.

Розвиток зрошуваного землеробства може впливати на річки Хаджидер і Алкалія як прямо, через локальний неконтрольований водозабір і регулювання стоку, так і опосередковано – через поверхневий змив ґрунтових частинок, залишків поживних речовин та засобів захисту рослин; інфільтрацію поливної води і надходження солей та нітратів до підземних вод; підняття рівня підґрунтових вод, підтоплення і вторинне засолення ґрунтів; скид мінералізованих дренажних вод; трансформацію заплав і прибережних смуг об'єктами меліоративної інфраструктури [16, 17]. Інтенсивність цих процесів залежить від джерела та якості поливної води, способу поливу, величини поливних норм, технологій обробітку ґрунту і дотримання водо- та ґрунтоохоронних обмежень. Краплинне зрошення дає змогу зменшити витрати води і поверхневий стік, проте потребує контролю глибокої фільтрації та сольового режиму ґрунтів. Досвід Дунай-Дністровської зрошувальної системи підтверджує, що використання води несприятливого хімічного складу може спричиняти тривале накопичення солей у профілі південних чорноземів [18, 19].

Отже, актуальність дослідження зумовлена необхідністю узгодження двох стратегічних пріоритетів – розвитку зрошуваного землеробства та збереження малих річок і пов'язаних із ними природоохоронних територій. Для басейнів Хаджидеру й Алкалії це потребує комплексного порівняння альтернативних сценаріїв із різним поєднанням заходів. Таке оцінювання має створити наукове підґрунтя для вибору стратегії, яка забезпечуватиме аграрне використання території за мінімізації ризиків для річкових і лиманних екосистем.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження відповідає завданням Стратегії зрошення та дренажу в Україні на період до 2030 року, Водної стратегії України на період до 2050 року та Довгострокового плану розвитку іригаційного комплексу України до 2050 року, якими передбачено відновлення і модернізацію меліоративної інфраструктури, підвищення ефективності водокористування та врахування екологічних обмежень під час планування водогосподарської діяльності [5 – 8]. Водночас робота сприяє реалізації Основних засад державної екологічної політики України на період до 2030 року, Стратегії збереження біологічного різноманіття України на період до 2035 року, положень Бернської конвенції щодо охорони природних оселищ і видів та євроінтеграційних завдань із формування репрезентативної й ефективно керованої мережі природоохоронних територій [11 – 14].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження стану річкових екосистем розглядають зміну клімату та господарське використання водозборів як взаємопов'язані чинники гідрологічної й екологічної трансформації водотоків [20, 21]. Для малих маловодних річок скорочення стоку або подовження безстічних періодів посилює вплив регулювання русел, водозаборів і забруднення, а антропогенно зумовлений водний стрес істотно змінює функціонування річкових екосистем [23]. Сільськогосподарське освоєння територій впливає на річки через сукупність гідрологічних, гідрохімічних і гідроморфологічних процесів. Інтенсивність впливу визначається часткою сільськогосподарських угідь, технологіями обробітку ґрунту, станом прибережних захисних смуг, конфігурацією полів і наявністю руслорегулювальних споруд тощо. Розширення зрошуваного землеробства підвищує стабільність аграрного виробництва, проте за дефіциту водних ресурсів може скорочувати екологічний стік і посилювати конкуренцію за поверхневі та підземні води [22].

Для Північно-Західного Причорномор'я досліджено вплив зміни клімату у контексті водного балансу приморських лиманів. Встановлено тенденцію до збільшення дефіциту їхнього прісного водного балансу внаслідок зміни співвідношення опадів, випаровування та стоку з водозборів. Тузловську групу лиманів віднесено до водойм, уразливих до подальшого обміління і зростання солоності, що потребує спеціальних водогосподарських та природоохоронних рішень [3, 4].

Гідрохімічні дослідження малих річок Одеської області характеризують значне антропогенне навантаження та просторову неоднорідність якості вод. Забруднення річок Причорномор'я, зокрема р. Хаджидер й Алкалія, пов'язують з інтенсивним сільськогосподарським використанням прилеглих територій, надходженням стічних вод і транскордонним впливом [23, 24]. Оцінювання іригаційного потенціалу малих і середніх річок Причорномор'я показало обмеженість їхнього стоку та несприятливу мінералізацію вод, тому розвиток регіонального зрошення має спиратися переважно на ресурси Дунаю і Дністра [25]. Разом з тим, для екосистем р. Хаджидер і Алкалія, і як наслідок, водних екосистем НПП «Тузловські лимани», принципове значення мають опосередковані наслідки інтенсифікації землеробства – зміни поверхневого і дренажного стоку, ерозійного винесення, сольового та біогенного навантаження.

У наукових працях гідрокліматичні зміни, якість води, сільськогосподарське навантаження, перспективи розвитку зрошення та завдання збереження природного біорізноманіття здебільшого розглядаються як окремі напрями досліджень. Така фра-

гментарність ускладнює розроблення комплексних управлінських рішень, які мають одночасно враховувати взаємопов'язані, а подекуди й суперечливі водогосподарські, агроекологічні та природоохоронні цілі.

Застосування MCDA у природоохоронному плануванні свідчить про ефективність цього підходу для визначення управлінських пріоритетів, зонування територій, порівняння альтернативних сценаріїв і вибору відновлювальних заходів [26, 27]. Його перевагами є можливість поєднання кількісних показників із формалізованими експертними оцінками, чітке визначення критеріїв, комплексне врахування різних аспектів досліджуваної проблеми, виявлення компромісів між альтернативами та перевірка стійкості отриманих результатів. Аналіз доступних публікацій засвідчив, що для басейнів річок Хаджидер і Алкалія та території НПП «Тузловські лимани» досі не проводилися комплексні дослідження, у яких вплив зміни клімату, сільськогосподарського навантаження та можливого розвитку зрошення було б інтегровано в єдину модель і враховано під час багатокритеріального порівняння стратегічних сценаріїв управління територією, що зумовлює актуальність даного дослідження.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Для річок Хаджидер і Алкалія та пов'язаних із ними водозалежних екосистем НПП «Тузловські лимани» раніше не проводилося комплексного порівняння альтернативних поєднань водогосподарських, агроекологічних і природоохоронних заходів. Невизначеним залишається, який із можливих сценаріїв має бути пріоритетним для досліджуваної території.

Новизна. Уперше для басейнів річок Хаджидер і Алкалія запропоновано та оцінено альтернативні підходи управління територією з урахуванням кліматично зумовлених обмежень, агроекологічних і природоохоронних вимог.

Методологічне або загальнонаукове значення. Апробовано підхід багатокритеріального сценарного оцінювання для формалізованого порівняння альтернативних варіантів управління територією за одночасного врахування кліматично зумовлених обмежень, агроекологічних і природоохоронних вимог. Застосована процедура може бути використана для розроблення управлінських рішень в інших басейнах малих річок, пов'язаних із природоохоронними територіями.

Виклад основного матеріалу. Метою дослідження було сформувати та порівняти альтернативні сценарії, що передбачають різне поєднання водогосподарських, агроекологічних і природоохоронних заходів для зменшення навантаження на річки Хаджидер і Алкалія та пов'язані з ними водозалежні екосистеми. Методичну основу дослідження становив адаптований підхід до багатокритеріального оцінювання, запропонований Р. Стівенсом [28], який поєднує опис системи, структурний аналіз взаємозв'язків між її компонентами та порівняння альтернативних сценаріїв за функціями корисності. На першому етапі дослідження виконано опис системи (*System sketch*), зокрема визначено просторові межі системи, її основні компоненти і взаємозв'язки між ними. Досліджувану систему розглядали як цілісний природно-господарський комплекс, що охоплює водозбори річок Хаджидер і Алкалія, їхні русла та пригирлові ділянки, пов'язані з ними лимани, сільськогосподарські угіддя і водозалежні екосистеми НПП «Тузловські лимани» (рис. 1). Транскордонну частину водозборів у межах Республіки Молдова враховували як зовнішню складову формування річкового стоку й антропогенного навантаження.

Для формування і верифікації системи показників було залучено експертів за напрямами: гідрології і управління водними ресурсами; зрошення, меліорації та охорони ґрунтів; управління природоохоронними територіями; зміни клімату та адаптації, екологічного планування та багатокритеріального аналізу. За результатами експертного обговорення для подальшого структурного аналізу відібрано 15 компонентів, об'єднаних у п'ять груп: кліматичні чинники; гідрологічні та водогосподарські чинники; сільськогосподарські джерела навантаження; показники стану водних об'єктів; екологічні компоненти системи. До кліматичних чинників віднесено зміну клімату, що проявляється підвищенням температури повітря, зменшенням кількості опадів і збільшенням тривалості посушливих періодів, а також пов'язане з нею зростання випаровування. Гідрологічні та водогосподарські чинники охоплювали скорочення і сезонну нестійкість річкового стоку, поверхневий водозабір та регулювання стоку ставками, водосховищами і дамбами. Сільськогосподарське навантаження характеризували часткою орних земель, інтенсивністю застосування засобів удобрення і хімізації та станом прибережних захисних смуг. Показниками стану водних об'єктів визначено мінералізацію води, евтрофікацію, замулення і хімічне забруднення. Кінцевими екологічними компонентами системи обрано водне біорізноманіття малих річок і біорізноманіття охоронюваних лиманів.

Структурний аналіз (System Analysis) передбачав попарну оцінку взаємовпливів між усіма 15 компонентами за шкалою від 0 до 4 балів (0 – вплив відсутній, 1 – слабкий, 2 – помірний, 3 – сильний, 4 – дуже сильний). Для кожної пари визначали медіану індивідуальних експертних оцінок; сумарний вплив компонента розраховували як суму значень відповідного рядка матриці, а сумарну залежність – як суму значень відповідного стовпця. Співвідношення цих показників використовували для позиціонування кожного компонента в координатах «сумарний вплив – сумарна залежність» (рис. 2).



Рис. 1. Просторове розташування досліджуваної території

Результати структурного аналізу показали, що найбільший сумарний вплив на інші компоненти системи має частка орних земель у межах водозборів. Високими значеннями впливу також характеризувалися річковий стік і регулювання стоку ставками, водосховищами та дамбами (по 33 бали), прояви зміни клімату і пов'язане з ними випаровування (по 29 балів), а також поверхневий водозабір (27 балів). Отже, основними драйверами функціонування досліджуваної системи є інтенсивність сільськогосподарського використання водозборів, кліматично зумовлений дефіцит води та водогосподарська трансформація річкового стоку. Найбільш залежними від сукупного впливу системи виявилися водне біорізноманіття малих річок та біорізноманіття охоронюваних лиманів. Високу залежність також встановлено для евтрофікації, хімічного забруднення вод, мінералізації води і поверхневого водозабору. Річковий стік і регулювання водотоків ставками, водосховищами та дамбами займають проміжне положення між первинними чинниками навантаження і кінцевими екологічними наслідками. З одного боку, вони залежать від кліматичних умов, структури землекористування та водокористування, а з іншого – визначають інтенсивність мінералізації, евтрофікації, замулення і хімічного забруднення вод. Таким чином, збереження біорізноманіття малих річок і лиманів потребує управлінського впливу передусім на системні драйвери, а не лише реагування на вже сформовані прояви деградації водних екосистем.

На основі результатів структурного аналізу експертами сформовано перелік управлінських заходів: скорочення поверхневого водозабору; оптимізація кількості та площі ставків і водосховищ; відновлення прибережних захисних смуг; перегляд доз і способів внесення добрив; розширення органічного землеробства; розширення територій краплинного зрошення в умовах відновлення зрошення на прилеглих

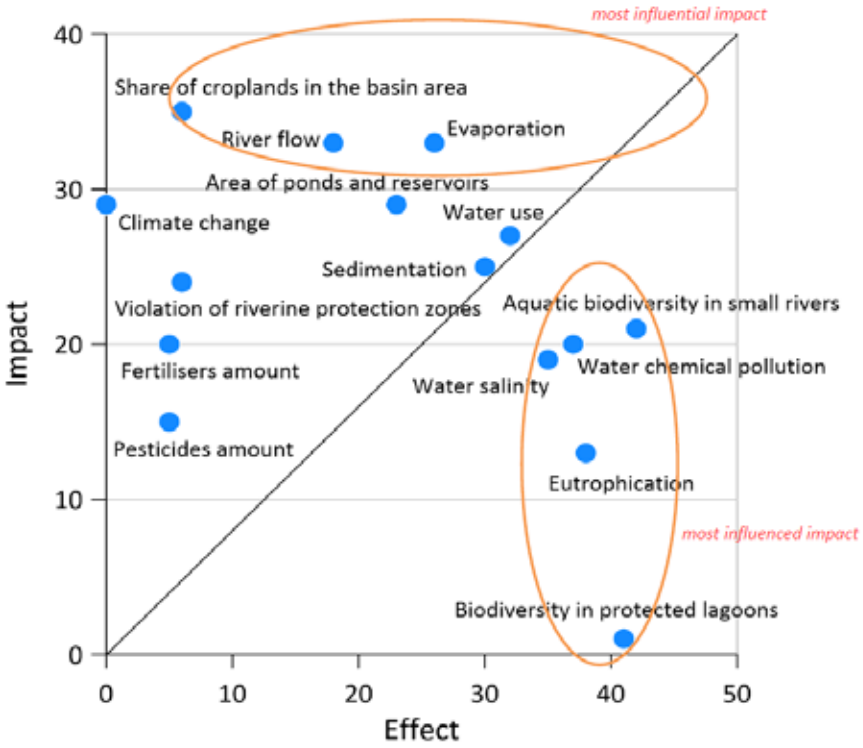


Рис. 2. Розподіл компонентів досліджуваної системи за співвідношенням сумарного впливу та залежності (Impact – сумарний вплив компонента на інші елементи системи; Effect – сумарна залежність компонента від впливу системи)

територіях; розширення мережі та переліку показників моніторингу поверхневих вод.

Відносну пріоритетність заходів визначали шляхом експертного попарного порівняння. Перевагу одного заходу над іншим оцінювали за шкалою від 1 до 9, де 1 означало однакову важливість заходів, 3 – помірну, 5 – істотну, 7 – дуже сильну, а 9 – абсолютну перевагу одного заходу над іншим; для зворотних порівнянь використовували обернені значення. Для кожного заходу розраховували пріоритетний бал p_i як суму значень відповідного рядка матриці без діагонального елемента. Отримані бали використовували для зваженого порівняння сценаріїв із подальшим нормуванням результату за їх загальною сумою.

Для приведення показників із різними одиницями вимірювання до порівнянного вигляду кожне значення трансформували у безрозмірну шкалу від 0 до 1, де вищі значення відповідають більшому очікуваному позитивному ефекту заходу. На відміну від класичного розуміння «корисності» як переваги альтернативи самої по собі, тут функція корисності відображає ступінь наближення сценарного значення показника до цільового рівня: для показників, зменшення яких бажане (водозабір, площа ставків, обсяг добрив), корисність зростає зі зниженням значення; для показників, зростання яких бажане (частка захисних смуг, органічного землеробства, краплинного зрошення, пунктів і показників моніторингу), – навпаки. Форму часткових функцій визначали на основі експертних оцінок очікуваного екологічного та водогосподарського ефекту заходу.

З огляду на обмеженість узгоджених кількісних даних для досліджуваної території базові та цільові значення показників задавали як експертно визначені сценарні параметри. Базове значення характеризувало умовно прийнятий вихідний стан, а цільове – бажаний рівень реалізації відповідного заходу. Наведені значення використовували виключно для порівняння альтернативних сценаріїв і не розглядали як результати натурного моніторингу або точний прогноз зміни стану території. Кожен із трьох сценаріїв відображає окремий підхід до пріоритизації управлінських заходів. Водогосподарський сценарій передбачає реалізацію заходів із регулювання водного режиму – скорочення поверхневого водозабору, оптимізацію площі ставків і водосховищ, відновлення прибережних захисних смуг та розширення пунктів і переліку показників моніторингу на рівні, близькому до цільового, за обмеженого впровадження агроекологічних заходів. Агроекологічний сценарій передбачає пріоритетне скорочення застосування мінеральних добрив, розширення площ органічного землеробства і краплинного зрошення за незначних змін водогосподарського регулювання.

Таблиця 1

Сценарні параметри та часткова корисність управлінських заходів за альтернативними сценаріями

Управлінський захід	Пріоритетний бал p_i	Показник	Умовно прийняте базове значення	Цільове значення	Водогосподарський сценарій, значення / u_i	Агроекологічний сценарій, значення / u_i	Інтегрованийсценарій, значення / u_i
Скорочення поверхневого водозабору	16,0	Частка поверхневого водозабору в загальному водокористуванні, %	50	10	10 / 1,0	38 / 0,3	22 / 0,7
Оптимізація площі ставків і водосховищ	13,3	Загальна площа ставків і водосховищ, га	1000	200	200 / 1,0	840 / 0,2	520 / 0,6
Відновлення прибережних захисних смуг	5,2	Частка відновлених прибережних захисних смуг, %	10	100	100 / 1,0	37 / 0,3	64 / 0,6
Зменшення норм внесення мінеральних добрив	8,0	Норма внесення мінеральних добрив, кг/га	94	70	89,2 / 0,2	79,6 / 0,6	84,4 / 0,4
Розширення площ органічного землеробства	14,0	Частка органічних угідь у загальній площі ріллі, %	1	30	3,9 / 0,1	30 / 1,0	24,2 / 0,8
Розширення площ краплинного зрошення	11,3	Частка зрошуваних угідь із краплинним поливом, %	10	30	14 / 0,2	30 / 1,0	24 / 0,7
Удосконалення моніторингу поверхневих вод	1,54	Кількість пунктів моніторингу в басейнах, од.	2	12	12 / 1,0	5 / 0,3	8 / 0,6

Інтегрований сценарій поєднує помірне впровадження заходів обох груп без досягнення цільових значень за окремими напрямами, але з одночасним поліпшенням усіх оцінюваних показників (табл. 1).

Часткову корисність u_{is} розглядали як ступінь наближення значення показника за відповідним сценарієм до його цільового рівня. Значення $u_{is} = 0$ відповідало умовно прийнятому базовому рівню, а $u_{is} = 1$ – досягненню цільового значення показника, а проміжні значення характеризували часткове виконання заходу. Сценарні значення показників розраховували шляхом лінійної інтерполяції між поточним і цільовим рівнями (табл. 1).

Інтегральну корисність кожного сценарію визначали як суму добутків вагових коефіцієнтів і часткової корисності заходів:

$$U_s = \frac{\sum_{i=1}^{m} p_i u_{is}}{\sum_{i=1}^{m} p_i},$$

де U_s – нормована інтегральна корисність сценарію s;

p_i – пріоритетний бал i-го заходу;

u_{is} – часткова корисність i-го заходу за сценарієм s;

m – кількість оцінюваних заходів.

Інтегрований сценарій отримав найвище значення сумарної корисності – 45,53 бала (0,657 після нормування); для водогосподарського сценарію цей показник становив 41,30 бала (0,596), а для агроекологічного – 39,58 бала (0,571). Перевага інтегрованого сценарію зумовлена одночасним упровадженням водогосподарських та агроекологічних заходів, що мають найбільші вагові коефіцієнти. Водогосподарський сценарій забезпечував максимальне наближення до цільових показників скорочення водозабору, оптимізації площі штучних водойм і відновлення прибережних захисних смуг, але передбачав обмежене впровадження агроекологічних заходів. Агроекологічний сценарій, навпаки, передбачав найбільше скорочення застосування мінеральних добрив і розширення органічного землеробства та краплинного зрошення, але недостатньо враховував заходи щодо поліпшення водного режиму річок.

Для перевірки стійкості ранжування ваговий коефіцієнт кожного заходу послідовно збільшували та зменшували на 20%, залишаючи інші ваги незмінними, з наступною повторною нормалізацією. За всіх перевірених варіантів інтегрований сценарій зберігав першу позицію: його нормована корисність змінювалася в межах 0,651 – 0,663, водогосподарського – 0,576 –0,617, агроекологічного – 0,553 – 0,588; мінімальна різниця з найближчою альтернативою становила 0,034. Це свідчить, що перевага інтегрованого сценарію визначається сукупним

ефектом водогосподарських та агровиробничих змін, що підтверджує доцільність їх поєднання.

Отримані оцінки мають переважно експертний характер. Вагові коефіцієнти, сценарні значення показників і форма часткових функцій корисності базуються на судженнях залучених фахівців у межах структурованої процедури, а не на суцільному ряді натурних спостережень. Тому результати варто розглядати як обґрунтоване ранжування альтернатив, а не як точний прогноз. Чутливість підходу до самих сценарних значень і форми функцій корисності залишається напрямом подальшого уточнення моделі.

Головні висновки. Структурний аналіз засвідчив, що основними драйверами трансформації досліджуваної системи є висока розораність водозборів, зміни річкового стоку, його регулювання ставками й водосховищами, поверхневий водозабір та кліматично зумовлене посилення дефіциту води. Найбільш залежними компонентами виявилися водне біорізноманіття малих річок і біорізноманіття охоронюваних лиманів, стан яких формується через сукупні зміни мінералізації, евтрофікації, замулення та хімічного забруднення вод. Багатокритеріальне оцінювання показало, що за прийнятих сценарних параметрів найбільшу нормовану корисність мав інтегрований сценарій – 0,657 порівняно з 0,596 для водогосподарського та 0,571 для агроекологічного сценарію. Його перевага визначалася поєднанням водогосподарських і агроекологічних заходів та зберігалася за зміни їхніх пріоритетних балів у межах ±20 %. Отже, у межах сформованої моделі інтегроване поєднання заходів є більш пріоритетним порівняно з їх реалізацією за окремими напрямами.

Отримані результати мають переважно експертний характер і відображають ранжування альтернатив у межах прийнятих припущень щодо вагових коефіцієнтів заходів і сценарних значень показників; уточнення вихідних даних натурними спостереженнями є напрямом подальшого розвитку моделі.

Перспективи використання результатів дослідження. Запропонований підхід може бути використаний під час розроблення планів управління територіями, обґрунтування заходів із відновлення малих річок, планування розвитку зрошення та визначення природоохоронних обмежень для прилеглих до НПП «Тузловські лимани» територій. Результати також можуть бути враховані у стратегічній екологічній оцінці документів територіального і водогосподарського планування, планах управління НПП та під час оцінювання впливу сільськогосподарських і меліоративних проєктів на території Смарагдової мережі.

Подальше вдосконалення моделі доцільно здійснювати шляхом її доповнення даними гідрологічного й гідрохімічного моніторингу, просторовими характеристиками землекористування, показниками стану ґрунтів і підземних вод та економічними оцінками вартості запропонованих заходів, а також перевіркою узгодженості експертних оцінок і чутливості результату до форми часткових функцій корисності. Це дасть змогу уточнювати сценарні параметри, періодично переглядати їх пріоритетність і адаптувати модель для інших басейнів малих річок, гідрологічно пов’язаних із природоохоронними територіями.

Acknowledgements. O. Drozd is grateful for the support provided within the project UCRAN20045, *Soils and Nature Conservation in Ukrainian Agriculture*, funded by the Spanish National Research Council (Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC) under the IUCRAN2022 call, which made it possible to conduct research in this area.

Література

1. Shagany-Alibei-Burnas Lakes System. Ramsar Sites Information Service : website. Site No. 763. URL: https://rsis.ramsar.org/ris/763 (Last accessed: 08.08.2026).
2. Про створення національного природного парку «Тузловські лимани» : Указ Президента України від 1 січ. 2010 р. № 1/2010. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/1/2010 (дата звернення: 08.08.2026).
3. Попова О. М. Морфометрія та топонімія гідрологічних об’єктів національного природного парку «Тузловські лимани». *Вісник Одеського національного університету. Географічні та геологічні науки*. 2017. Т. 21, вип. 2 (29). С. 64–84. DOI: 10.18524/2303-9914.2016.2(29).103798.
4. Tuchkovenko Y., Khokhlov V., Loboda N. Climate change impact on water balance of quasi-closed lagoons in the North-Western Black Sea coast. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*. 2022. No. 29. P. 32–47. DOI: 10.31481/uhmj.29.2022.03.
5. Про схвалення Стратегії зрошення та дренажу в Україні на період до 2030 року : розпорядження Кабінету Міністрів України від 14 серп. 2019 р. № 688-р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/688-2019-р (дата звернення: 21.08.2026).
6. Про затвердження плану заходів з реалізації Стратегії зрошення та дренажу в Україні на період до 2030 року : розпорядження Кабінету Міністрів України від 21 жовт. 2020 р. № 1567-р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/1567-2020-р (дата звернення: 21.08.2026).
7. Про схвалення Водної стратегії України на період до 2050 року : розпорядження Кабінету Міністрів України від 9 груд. 2022 р. № 1134-р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/1134-2022-р (дата звернення: 21.08.2026).
8. Про затвердження Довгострокового плану розвитку іригаційного комплексу України до 2050 року : розпорядження Кабінету Міністрів України від 25 берез. 2025 р. № 280-р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/280-2025-р (дата звернення: 21.08.2026).

9. Форум аграріїв Одещини: євроінтеграція, меліорація та виклики воєнного часу / Одеська обласна державна адміністрація: веб-сайт. URL: https://oda.od.gov.ua/ua/news/forum-agrariyiv-odeshhini-yevrointegracziya-melioracziya-ta-vikliki-voyennogo-chasu (дата звернення: 18.08.2026).
10. Мєдвєдєв О. Ю. Гідрохімічний стан джерел зрошення Одещини в 2020 році. *Сучасний стан та перспективи розвитку меліорації земель* : матеріали Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф., присвяч. дню пам'яті д-ра геогр. наук, проф. О. Ф. Литовченка, Дніпро, 30 листоп. 2020 р. Дніпро : ДДАЕУ, 2020. С. 33–34. URL: https://dspace.dsau.dp.ua/bitstreams/12b3c9c7-7588-4850-9355-5df855977cc2/download (дата звернення: 11.08.2026).
11. Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року : Закон України від 28 лют. 2019 р. № 2697-VIII. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/2697-19 (дата звернення: 21.08.2026).
12. Про схвалення Стратегії збереження біологічного різноманіття України на період до 2035 року та затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2026–2028 роках : розпорядження Кабінету Міністрів України від 15 лип. 2026 р. № 708-р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/708-2026-р (дата звернення: 21.08.2026).
13. European Commission. *EU Biodiversity Strategy for 2030: Bringing Nature Back into Our Lives* : Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. COM(2020) 380 final. Brussels, 2020. 23 p. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0380 (Last accessed: 18.08.2026).
14. Council of Europe. Updated List of Officially Adopted Emerald Network Sites. Strasbourg, 2025. 59 p. Document T-PVS/PA(2025)05. URL: https://rm.coe.int/pa05e-2025-extract-list-decisions-texts-adopted-44sc-2769-4712-2192-1/4880289d50 (Last accessed: 28.08.2026).
15. Хаджидер – Алкалія (UA0000577). *Території, що пропонуються до включення у мережу Емеральд (Смарагдову мережу) України («тіньовий список», частина 3)* / за заг. ред. К. Борисенко, А. Куземко, В. Коломійчук, Ю. Спінової, Ю. Куцоконь. Чернівці : Друк Арт, 2020. С. 321. URL: https://ekmair.ukma.edu.ua/handle/123456789/19973 (дата звернення: 18.08.2026).
16. Critical factors influencing soil runoff and erosion in sprinkler irrigation: Water application rate and droplet kinetic energy / R. Chen, H. Li, J. Wang, Z. Song. *Agricultural Water Management*. 2023. Vol. 283. Article 108299. DOI: 10.1016/j.agwat.2023.108299.
17. Foster S. Salinization of groundwater by irrigation return flows. *Irrigation and Drainage*. 2022. Vol. 71, No. 3. P. 728–734. DOI: 10.1002/ird.2681.
18. Носоненко О. А., Захарова М. А. Динаміка галогенезу чорнозему звичайного, зрошуваного мінералізованими водами. *Агрохімія і ґрунтознавство*. 2023. Вип. 95. С. 13–23. DOI: 10.31073/acss95-02.
19. Зрошувані землі Дунай-Дністровської зрошувальної системи: еволюція, екологія, моніторинг, охорона, родючість : колективна монографія / за ред. С. А. Балюка. Харків : Антіква, 2001. 260 с.
20. Emerging threats and persistent conservation challenges for freshwater biodiversity / A. J. Reid et al. *Biological Reviews*. 2019. Vol. 94, No. 3. P. 849–873. DOI: 10.1111/brv.12480.
21. One-quarter of freshwater fauna threatened with extinction / C. A. Sayer et al. *Nature*. 2025. Vol. 638. P. 138–145. DOI: 10.1038/s41586-024-08375-z.
22. Half of twenty-first century global irrigation expansion has been in water-stressed regions / P. Mehta et al. *Nature Water*. 2024. Vol. 2, No. 3. P. 254–261. DOI: 10.1038/s44221-024-00206-9.
23. Кічук Н. С., Овчарук В. А., Кущенко Л. В. Оцінка якості води річок Причорномор'я в межах Одеської області за гідрохімічними показниками. *Вісник Одеського національного університету. Географічні та геологічні науки*. 2025. Т. 30, вип. 1 (46). С. 35–53. DOI: 10.18524/2303-9914.2025.1(46).332352.
24. Даус М. Є. Антропогенне навантаження та оцінювання якості води у басейні річки Хаджидер. *Екологічні науки*. 2026. № 2 (65). С. 134–141. DOI: 10.32846/2306-9716/2026.eco.2-65.20.
25. Іригаційний потенціал малих і середніх річок басейну Причорномор'я у межах Одеської області / В. Д. Караулов, С. М. Юрасов, О. В. Мудрак, Г. В. Мудрак. *Збалансоване природокористування*. 2024. № 1. С. 68–74. DOI: 10.33730/2310-4678.1.2024.302626.
26. Adem Esmail B., Geneletti D. Multi-criteria decision analysis for nature conservation: A review of 20 years of applications. *Methods in Ecology and Evolution*. 2018. Vol. 9, No. 1. P. 42–53. DOI: 10.1111/2041-210X.12899.
27. Belton V., Stewart T. J. *Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach*. Boston : Kluwer Academic Publishers, 2002. XIX, 372 p. DOI: 10.1007/978-1-4615-1495-4.
28. Platform for Development of Multi-National Projects in Education and Research : website. URL: https://kermitcooperation.wixsite.com/platform (Last accessed: 17.08.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 02.09.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

UDC 622:504.3+556.3
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.20

TRANSFORMATION OF GROUNDWATER HYDRODYNAMIC AND HYDROGEOCHEMICAL REGIMES UNDER THE INFLUENCE OF LONG-TERM COAL MINE OPERATION IN THE WESTERN DONBAS

Diachenko N.O. (orcid.org/0000-0002-4852-0203)
SI «Center for Mining Geology, Geoecology and Infrastructure Development of the NAS of Ukraine»
Akademika Vernadskoho Boulevard, 34B, 03142, Kyiv
natalidyachenko1969@gmail.com

The article presents the results of a comprehensive study of the transformation of the hydrodynamic and hydrogeochemical regimes of groundwater within the zone of influence of coal mining enterprises in the Western Donbas. The research is based on long-term monitoring of groundwater levels in different aquifers during 2010–2025, together with data on mine water mineralization and groundwater inflow rates. Spatial-statistical, cartographic, trend, and correlation analyses integrated with GIS technologies were applied to assess the long-term evolution of the groundwater system. The study identified the principal patterns of spatio-temporal transformation of the hydrodynamic regime caused by prolonged mine dewatering. Localized cones of depression were found to develop within the Paleogene aquifers, where groundwater levels declined by up to 8 m, while the Quaternary aquifer experienced a regional groundwater-level decrease of up to 2.5 m. A mechanism explaining the inversion of piezometric level changes in the Buchak and Obukhiv formation aquifers is proposed and substantiated. This inversion is associated with the transformation of the natural groundwater recharge and drainage system under the influence of continuous mine drainage. Analysis of long-term monitoring data demonstrated that groundwater inflow to the Dniprovska Mine increased more than tenfold, whereas the average mineralization of mine water increased almost fourfold. Third-order polynomial trend models ($R^2 = 0.6855$ and $R^2 = 0.7375$) reveal the staged transformation of the hydrodynamic and hydrogeochemical regimes during prolonged coal mining.

The scientific novelty of the study lies in identifying the regularities of the spatio-temporal transformation of groundwater within different aquifers of the WD based on a fifteen-year monitoring dataset and in substantiating the mechanism responsible for the inversion of piezometric levels induced by long-term mine drainage. The practical significance of the research consists in the applicability of the obtained results for predicting the development of groundwater depression cones, assessing environmental risks, improving groundwater monitoring systems, and supporting sustainable groundwater resource management in mining regions. *Key words:* groundwater; hydrodynamic regime; hydrogeochemical regime; mine drainage; cone of depression; mineralization; groundwater inflow; Western Donbas; aquifer groundwater; monitoring.

Трансформація гідродинамічного та гідрохімічного режимів підземних вод під впливом тривалої експлуатації вугільних шахт західного Донбасу. Д'яченко Н.О.

Означені результати комплексного дослідження трансформації гідродинамічного та гідрогеохімічного режиму підземних вод у зоні впливу вугледобувних підприємств Західного Донбасу. Наукова праця виконана на основі багаторічних режимних спостережень за рівнями підземних вод різних водоносних горизонтів упродовж 2010–2025 рр., даних щодо мінералізації шахтних вод та інтенсивності водоприпливів. Під час науково-екологічних досліджень використовувалися методи просторово-статистичного, картографічного, трендового та кореляційного аналізу із застосуванням ГІС-технологій. Встановлено закономірності просторово-часової перебудови гідродинамічної системи під впливом тривалого шахтного водовідливу. Виявлено формування локальних депресійних лійок у палеогенових водоносних горизонтах із максимальним зниженням рівнів до 8 м та регіональне зниження рівнів четвертинного водоносного горизонту до 2,5 м. Обґрунтовано механізм інверсії змін п'єзометричних рівнів у бучацькому та обухівському водоносних горизонтах, пов'язаний із трансформацією природної системи живлення та дренування підземних вод. Аналіз багаторічних моніторингових даних показав, що інтенсивність водоприпливів до шахти «Дніпровська» збільшилася більш ніж у десять разів, тоді як середня мінералізація шахтних вод зросла майже у чотири рази. Поліноміальні тренди третього порядку ($R^2 = 0{,}6855$ та $R^2 = 0{,}7375$) відображають стадійний характер перебудови гідродинамічного та гідрогеохімічного режимів у процесі тривалої експлуатації родовища.

Наукова новизна дослідження – визначення закономірностей просторово-часової трансформації підземних вод різних водоносних горизонтів Західного Донбасу за результатами п'ятнадцятирічного моніторингу та обґрунтуванні механізму інверсії п'єзометричних рівнів під впливом шахтного водовідливу. Практичне значення наукової праці – використання отриманих результатів під час прогнозування розвитку депресійних лійок, оцінювання екологічних ризиків, удосконалення систем моніторингу та управління водними ресурсами. *Ключові слова:* підземні води; гідродинамічний режим; гідрогеохімічний режим; шахтний водовідлив; депресійна лійка; мінералізація; водоприплив; Західний Донбас; водоносний горизонт; моніторинг, екологія довкілля.

© Diachenko N.O., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Problem statement. The Western Donbas (WD) is currently one of the largest underground coal mining regions in Ukraine, where industrial mine operation has continued for more than sixty years. Long-term mine drainage, the development of new mining horizons, the formation of mining-induced rock mass fracturing, and the intensification of hydraulic connections between aquifers have resulted in significant transformation of the natural hydrogeological environment. These processes lead to the formation of groundwater depression cones, changes in groundwater flow directions, redistribution of groundwater recharge and discharge areas, and deterioration of groundwater hydrochemical characteristics [1]. Mine water is one of the major sources of contamination of surface water bodies and the hydraulically connected groundwater [2].

Of particular environmental concern is the transformation of hydraulic interaction between aquifers of different geological ages, accompanied by the involvement of more highly mineralized confined groundwater in the mine drainage system, changes in groundwater recharge conditions, and the potential deterioration of groundwater quality used for domestic and drinking water supply. Under the current conditions of transformation of Ukraine's coal mining industry, forecasting long-term changes in the hydrodynamic and hydrogeochemical regimes of groundwater has become particularly important. Groundwater contamination caused by mining activities further aggravates the adverse environmental impacts of mineral extraction and may result in long-term and irreversible consequences for the environment. The current environmental legislation of Ukraine [3] requires environmental impact assessment of industrial activities, including their impact on groundwater.

Research relevance. The current stage of development of the coal mining industry is characterized not only by the operation of active mines but also by the closure of individual mining enterprises and changes in mine drainage regimes. Under these conditions, assessing long-term changes in the hydrodynamic and hydrogeochemical regimes of groundwater becomes particularly important, as these changes determine environmental safety, the condition of groundwater resources, and the extent of potential secondary contamination of the geological environment [4]. Despite the considerable number of previous studies, most of them have focused on individual aspects of mine drainage or local groundwater-level changes. Comprehensive investigations of the spatio-temporal transformation of the multi-aquifer groundwater system of the WD based on long-term monitoring observations are virtually absent. Therefore, an integrated analysis of long-term monitoring data using modern spatial analysis methods is of considerable scientific and practical importance.

Relationship of the study to important scientific and practical tasks. The study was carried out within the research activities of the State Institution «Scientific Centre for Mining Geology, Geoecology and Infrastructure Development of the National Academy of Sciences of Ukraine», aimed at assessing the technogenic transformation of the geological environment, ensuring the environmental safety of mining regions, and providing a scientific basis for the rational use and protection of groundwater resources. The objective of the study was to identify the patterns of spatio-temporal transformation of the hydrodynamic and hydrogeochemical regimes of groundwater within the zone of influence of coal mining enterprises in the WD based on long-term monitoring observations, statistical analysis, and GIS modelling, as well as to assess the degree of technogenic impact of mine drainage on aquifer conditions. The study is consistent with the current national priorities in the fields of environmental protection, water resources management, adaptation of mining regions to environmental challenges, and implementation of the provisions of the State Environmental Policy Strategy of Ukraine. The practical significance of the study lies in the possibility of applying the obtained results for predicting the development of groundwater depression cones, assessing changes in the hydrogeochemical regime, improving groundwater monitoring systems, and substantiating mine drainage management strategies.

Research methods. The study was based on long-term monitoring observations of groundwater levels and hydrochemical parameters obtained from 85 observation wells located within the Pavlograd–Petropavlivka Coal Mining District. To achieve the research objective, comparative hydrogeological regime analysis, spatial-statistical analysis, cartographic modelling, trend analysis, and correlation analysis were applied. Spatial interpretation of the results was carried out using GIS technologies through the construction of groundwater-level change maps and analysis of the patterns of groundwater depression cone development.

Analysis of recent research and publications. Research into the impact of mining activities on groundwater regimes is one of the key areas of modern hydrogeology and geoecology. In Ukraine, significant contributions to the study of the mechanisms governing mine drainage, the development of groundwater depression cones, and the transformation of hydrogeochemical regimes have been made by V. Suyarko [5], I. Sadovenko [6], D. Rudakov [7], O. Ulytskyi [8], and other researchers. Their studies identified the characteristics of technogenic hydrodynamic regime formation in coal mining regions, evaluated the impact of mine drainage on the quality of groundwater and surface water, and substantiated the principal mechanisms responsible for the development of mining-induced groundwater depression. In studies [9, 10], the authors addressed the formation of regional groundwater depression cones caused by mine dewatering and groundwater abstraction, as well as the correlation between groundwater chemical composition and hydrogeological conditions.

At the same time, recent international studies demonstrate that geoinformation technologies, spatial analysis,

mathematical modelling, and long-term monitoring methods are increasingly applied to assess long-term changes in hydrogeological systems. Particular attention is paid to predicting the transformation of aquifer systems following prolonged mine operation, evaluating the relationships between hydrodynamic and hydrochemical processes, and quantitatively assessing environmental risks [11].

Unresolved aspects of the general problem addressed by this study. Despite the considerable body of previous research, the patterns of spatio-temporal transformation of the multi-aquifer system of the WD under the combined influence of mine drainage, groundwater abstraction, and mining-induced modification of the filtration environment remain insufficiently understood. Comprehensive assessments of groundwater-level changes in different aquifers based on long-term monitoring observations using modern GIS technologies, statistical analysis, and integrated interpretation of hydrodynamic and hydrogeochemical processes are virtually absent.

Further investigation is required into the inversion of piezometric levels in the confined Paleogene aquifers, the characteristics of groundwater flow reorganization, and the relationships between the development of cones of depression, the intensity of mine drainage, and changes in mine water mineralization. The present study is aimed at addressing these issues.

Scientific novelty. The scientific novelty of this study lies in identifying the patterns of spatio-temporal transformation of the hydrodynamic and hydrogeochemical regimes of groundwater in the Western Donbas based on the results of fifteen years of monitoring observations. For the first time in the study area, an inversion pattern of piezometric-level changes has been identified in the Upper Paleogene aquifers. The mechanism responsible for its formation under the influence of long-term mine drainage has been substantiated, and the staged transformation of the hydrogeochemical regime has been established on the basis of long-term observations of mine water mineralization and groundwater inflow.

Main text. Coal mining in the Western Donbas has been carried out for more than six decades and has become one of the principal factors controlling the transformation of the region's hydrogeological conditions. Industrial development of the coal basin began in 1959 with the commissioning of the Ternivska Mine. Between 1963 and 1975, ten additional mines were brought into operation: Pershotravneva, Zakhidno-Donbaska, Pavlogradska, Blagodatna, Heroes of Space, Yuvileina, Stashkova, Samarska, Dniprovska, and Stepova (Fig. 1).

The Stashkova Mine completed extraction of its principal coal reserves in 2019, after which mining continued only within adjacent reserve blocks. Since 2021, the mine has been undergoing closure, accompanied by the gradual natural flooding of underground workings. At present, coal production is carried out by nine operating mines, with the greatest production concentrated within the central mining group, which accounts for the majority of current coal output in the WD [12, 13].

In addition to the coal mines, the study area includes a system of centralized groundwater wellfields (Verbskyi, Pavlogradskyi, Samarskyi, Ternivskyi, Svitlogorskyi, Pervomaiskyi, etc.), which mainly exploit groundwater from aquifers occurring within the Buchak and Kyiv Formations. Their long-term operation has resulted in the development of regional cones of depression superimposed on the technogenic drawdown cones produced by continuous mine dewatering. Groundwater regime and hydrochemical monitoring has been conducted since 1989 through a network of 85 observation wells (Figure 1) covering the principal aquifers of the Meso-Cenozoic hydrogeological sequence. Monitoring has been performed by Ukrgeologia LLC in accordance with approved hydrogeological monitoring programs [14, 15]. These long-term observations constitute the primary database for assessing temporal changes in groundwater hydrodynamic and hydrochemical regimes.

Geological and hydrogeological characteristics of the study area. From a geostructural perspective, the Pavlograd–Petropavlivka coal mining district is confined to the southwestern part of the Novomoskovsk–Petropavlivka monocline zone of the Dnieper–Donets Basin, which borders the northeastern slope of the Ukrainian Shield. The study area is located within the Samara horst uplift and is characterized by a complex block-faulted structure [16, 17], which controls the heterogeneity of groundwater flow conditions and the hydraulic interconnection between individual aquifers.

The relief is represented by a gently undulating denudation–accumulation plain dissected by the valleys of the Samara, Vovcha, Ternivka, and Byk rivers, as well as by a dense network of gullies and ravines. Absolute ground elevations range from +60 to +210 m, determining the characteristics of present-day surface runoff and groundwater flow.

The geological structure of the study area comprises Precambrian crystalline basement rocks overlain by a thick succession of Carboniferous, Triassic, Jurassic, Paleogene, Neogene, and Quaternary sedimentary deposits. Quaternary deposits are represented by loess-like loams, clays, and alluvial sands that form the upper unconfined aquifer. The thickness of the Quaternary sediments ranges from 5 to 35 m, while groundwater occurs at depths between 6 and 14 m below ground surface. Groundwater mineralization generally varies from 0.5 to 5.0 g/L.

Neogene deposits occur only locally and do not play a significant role in supplying groundwater inflows to the mines. The principal aquifer systems of the study area are associated with the Paleogene deposits, represented by the Buchak, Kyiv, Mezhigirska, and Berek Formations. The most productive groundwater reservoir is formed by the quartz sands of the Buchak Formation, which are extensively exploited for centralized municipal drinking water supply. These deposits are charac-

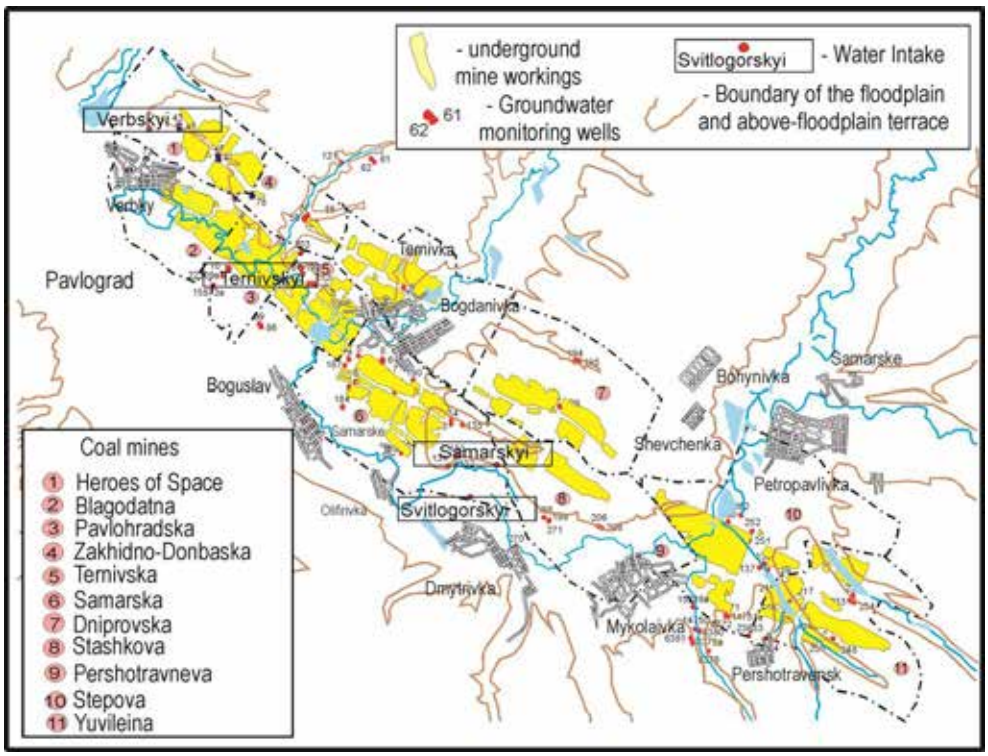


Fig. 1. Detailed layout of the study area and monitoring network

terized by high hydraulic conductivity and are hydraulically connected with the underlying aquifers.

The Carboniferous aquifer complexes, which constitute the principal source of groundwater inflows into underground mine workings, occur immediately beneath the Paleogene deposits. Owing to the discontinuous distribution and limited continuity of aquitards separating the individual stratigraphic units, active vertical groundwater exchange occurs throughout the study area. This hydraulic interaction has been substantially intensified by long-term mine dewatering.

Results of the monitoring data analysis. The transformation of the groundwater hydrodynamic regime was assessed by comparing the absolute groundwater level elevations obtained from monitoring observations conducted in June 2010 and June 2025. The analysis included measurements from 18 observation wells completed in the Quaternary aquifer, 19 wells in the Buchak–Obukhiv aquifer formation, and 36 wells in the Mezhigirska–Berek aquifer formation. In total, the study included 73 representative observation wells, providing uniform spatial coverage across the territories of eleven mining lease areas. The comparative analysis (Figure 2) indicates pronounced spatial heterogeneity in groundwater-level changes.

The largest amplitudes of groundwater-level change were recorded within the Buchak–Obukhiv aquifer system, where absolute piezometric-level variations range from +6 to –8 m. In contrast to the Paleogene aquifers, the Quaternary aquifer exhibits a predominantly regional decline in groundwater levels of approximately 2–2.5 m, spatially associated with river valleys and the gully–ravine network. This pattern indicates the predominance of natural drainage through the surface hydrographic network, which is further enhanced by the technogenic lowering of the regional groundwater table.

Cartographic modelling of the monitoring data (Figures 3–4) made it possible to characterize in greater detail the spatial configuration of the groundwater depression zones.

The largest drawdowns (up to 8 m) were identified in the Mezhyhirska and Berek aquifers within the areas of intensive mining operations [16, 17], namely at the Zakhidno-Donbaska, Blagodatna, Dniprovska, and Samarska mines, where new mining blocks and coal seams have been developed in recent years (Fig. 4).

The spatial coincidence of the maximum groundwater-level declines with the currently active mining areas indicates the dominant role of mine dewatering in shaping the present-day hydrodynamic field. The expansion of the depression zones beyond the initial boundaries of the mining areas confirms the involvement of adjacent aquifers in the drainage process. Particularly noteworthy is that the present-day depression troughs are formed not only above active longwall mining panels but also extend over large areas between adjacent mine fields. This indicates the development of an integrated regional system of anthropogenic drainage.

At the same time, the Buchak–Obukhiv Formations exhibits an inverse pattern of groundwater-level changes. Areas that were characterized by elevated piezometric levels under natural conditions have become the zones

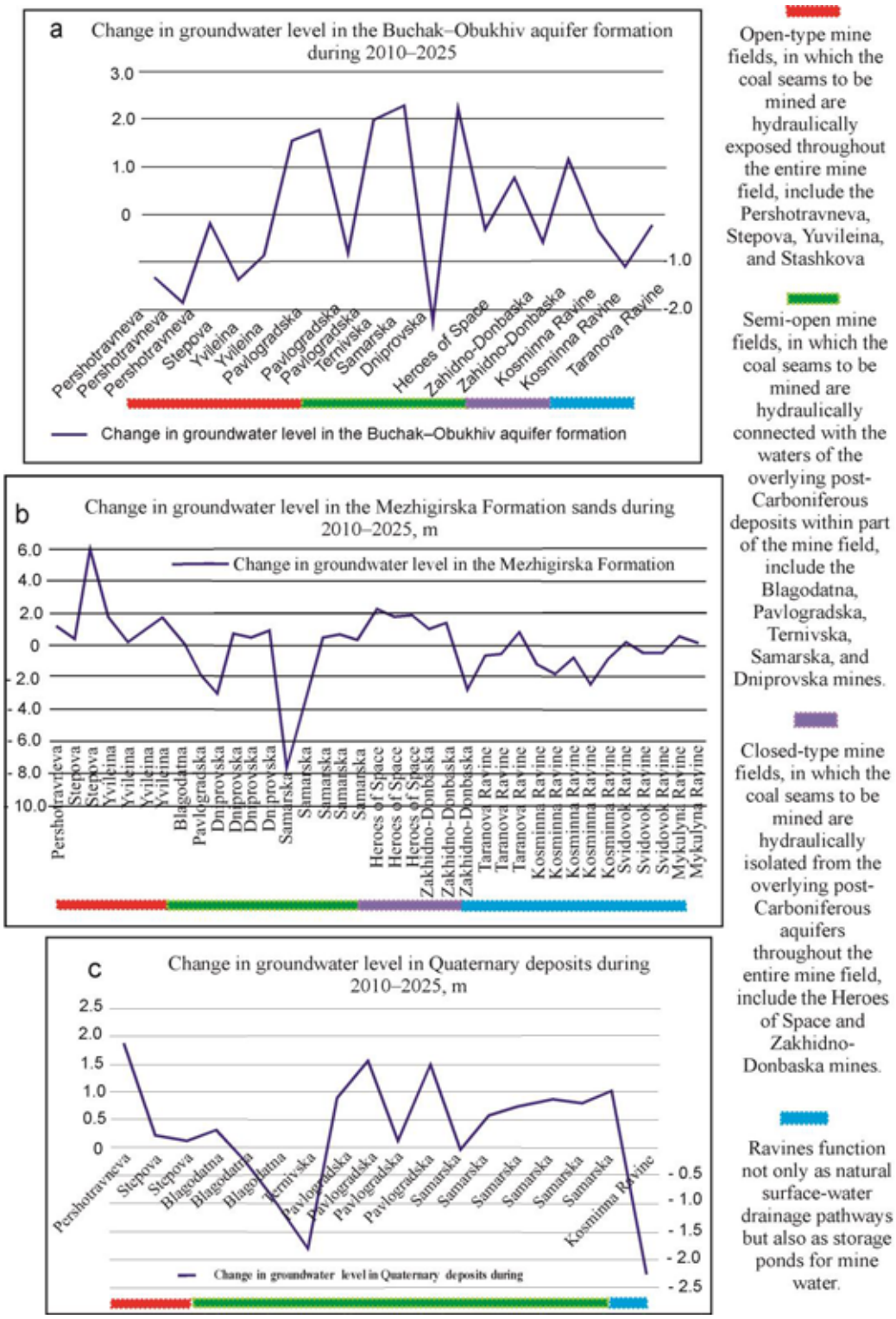


Fig. 2. Results of the comparative analysis of groundwater-level changes in different aquifer systems over a 15-year period

of the greatest groundwater-level decline under present-day conditions.

This distribution pattern indicates an inversion of the hydrodynamic regime caused by the transformation of the natural groundwater recharge system under the influence of mine drainage. Confined aquifers that formerly functioned as groundwater accumulation zones have gradually become areas of intensive discharge, while the direction of groundwater flow has changed from predominantly lateral to vertically downward.

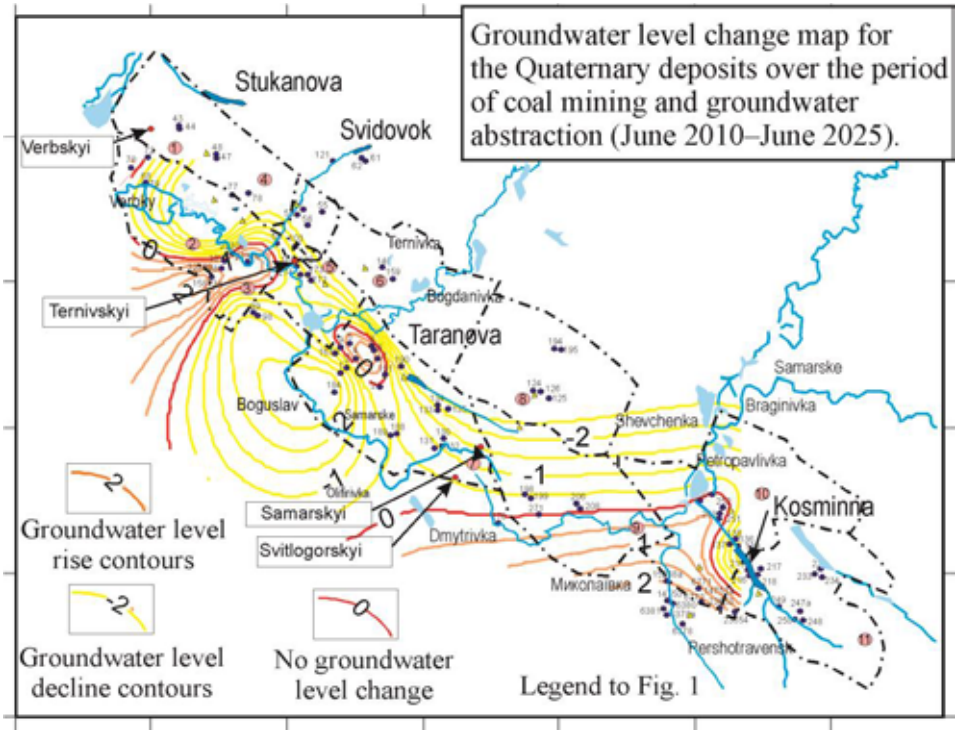


Fig. 3. Maps of groundwater level changes (2010–2025) in the Quaternary deposits within the study area

The nearly ubiquitous decline in groundwater levels within the Quaternary aquifer, reaching up to 2.5 m (Fig. 3), indicates the formation of a regional cone of depression spatially controlled by the present-day hydrographic network. This confirms the decisive role of the surface drainage system in the redistribution of groundwater resources under the influence of prolonged mine dewatering.

Thus, the results of the cartographic analysis demonstrate that long-term coal mining has led not only to the formation of local cones of depression but also to a regional restructuring of the entire hydrodynamic system of the Western Donbas.

Analysis of Long-Term Monitoring Data on Mine Water Inflow and Mine Water Mineralization (Case Study of the Dniprovska Mine). To evaluate the long-term transformation of the hydrogeochemical regime of groundwater, long-term monitoring data on mine water inflow and mine water mineralization at the Dniprovska Mine for the period 1975–2019 were analyzed. This mine was selected because of its long operational history, the completeness of the monitoring records, and its relatively simple hydrogeological conditions, which make it possible to identify the patterns of hydrological regime transformation during the progressive development of mining operations. The Dniprovska Mine is characterized by relatively low natural groundwater inflow. During the initial stage of mine operation, groundwater inflow originated predominantly from the Carboniferous aquifer system. Only coal seam C_{10}^{v} is in direct hydraulic contact with the water-bearing deposits of the Buchak Formation, whereas the remaining productive coal seams are overlain by a thick sequence of low-permeability rocks. In addition, the Bohdanivskyi and Pozdovzhnii faults act as regional hydrogeological barriers, substantially restricting groundwater inflow from adjacent areas.

As mining operations progressed and the mined-out area expanded, the cone of depression gradually enlarged, resulting in the involvement of groundwater from adjacent aquifers in the drainage process. This was reflected in both an increase in mine water inflow and changes in the chemical composition of mine water (Fig. 5).

The monitoring data indicate that during the study period the mineralization of mine water increased from 5.8–7.0 g/L at the initial stage of mine operation to 20–22 g/L under present-day conditions (Fig. 5). During the same period, the average mine water inflow increased more than tenfold, from 41 m³/h to 454 m³/h.

The obtained relationships indicate that changes in mine water mineralization are not monotonic. The curve clearly demonstrates several distinct stages corresponding to different phases in the development of the depression system. The initial stage is characterized by a relatively stable chemical composition of mine water, which can be explained by the predominance of drainage from the upper, weakly mineralized aquifers. The subsequent increase in mineralization indicates the gradual involvement of deeper confined groundwater from the Paleogene and Carboniferous aquifer systems in the mine dewatering process.

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

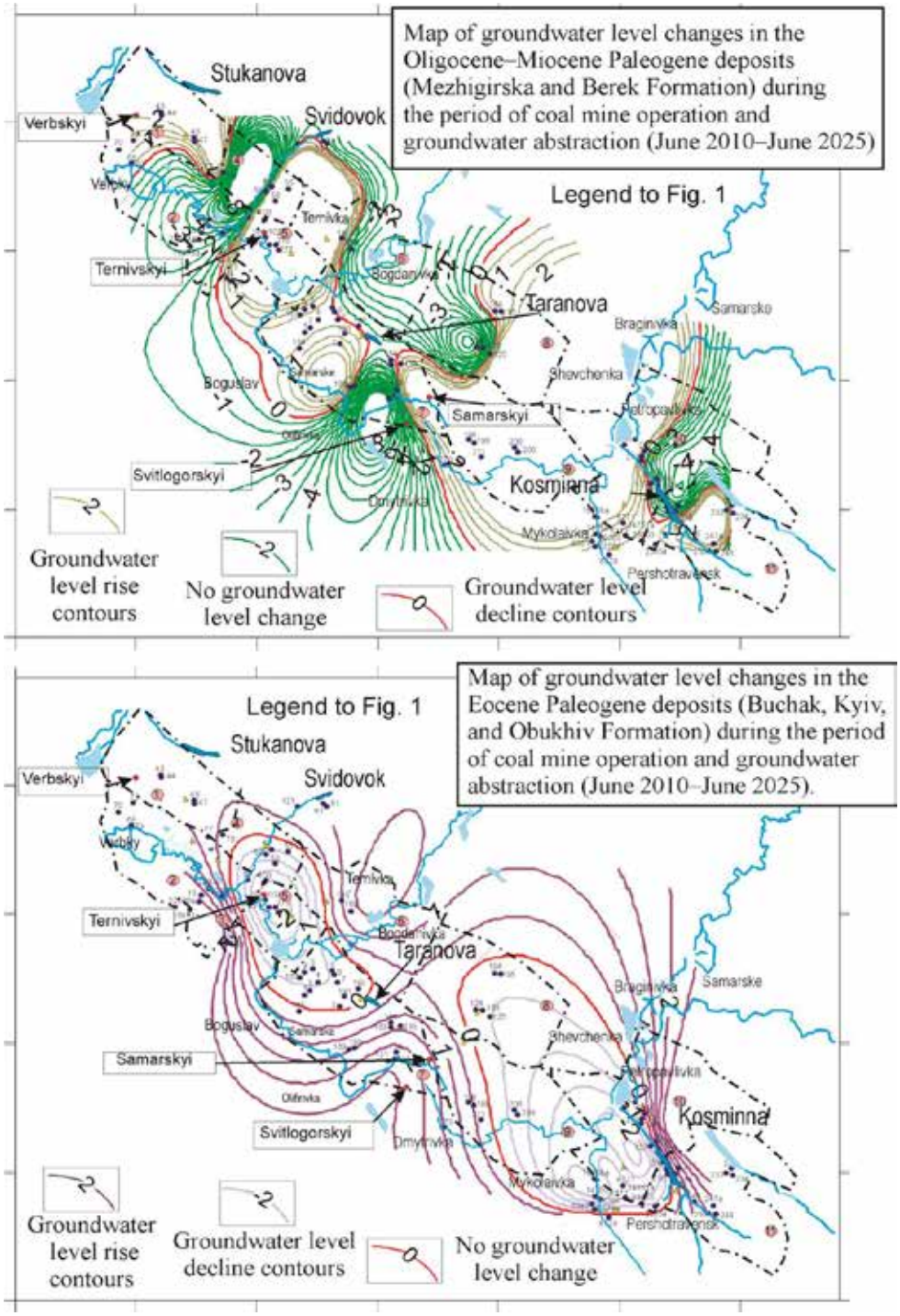


Fig. 4. Maps of groundwater level changes (2010–2025) in the Oligocene–Miocene (a) and Eocene (b) Paleogene deposits within the study area

To quantitatively evaluate the relationship between the hydrodynamic and hydrogeochemical parameters, the dependence between mine water inflow and mine water mineralization was analyzed (Fig. 6).

The correlation analysis yielded a correlation coefficient of r = 0.29, indicating a positive, although moderate, relationship between these parameters. This suggests that the increase in mine water inflow is not accompanied by dilution of mine water, as would typically be expected where recharge is dominated by atmospheric precipitation or groundwater from the Quaternary aquifer. Instead, the progressive development of mine dewatering results in the gradual involvement of more highly mineralized confined groundwater, leading to a simultaneous increase in both mine water inflow and overall mineralization.

A distinctive feature of the observed relationships is their pronounced nonlinear character. Linear trend lines

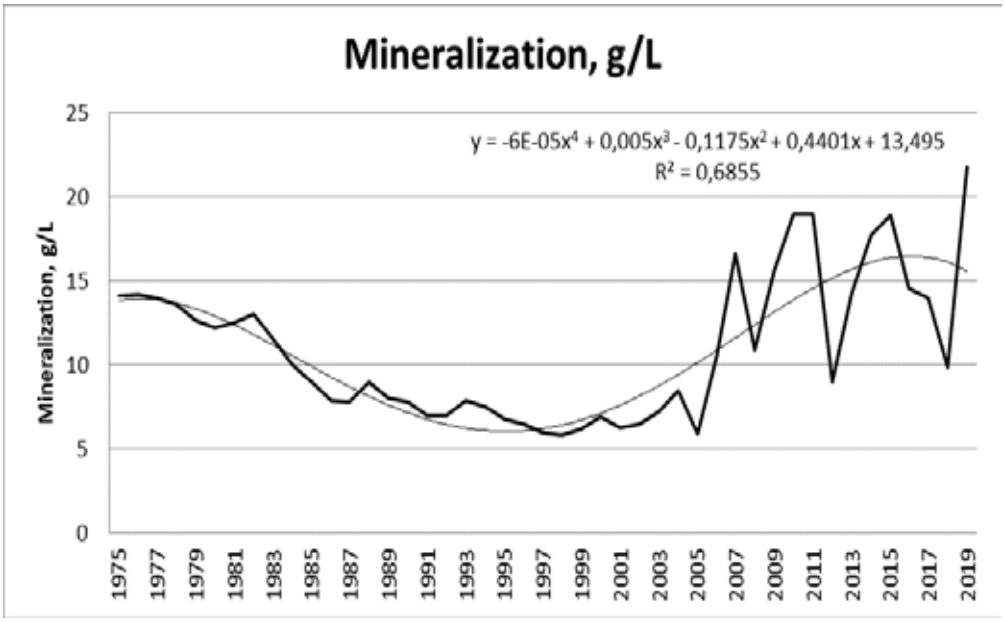


Fig. 5. Temporal changes in mine water mineralization over a 45-year period at the Dniprovska Mine

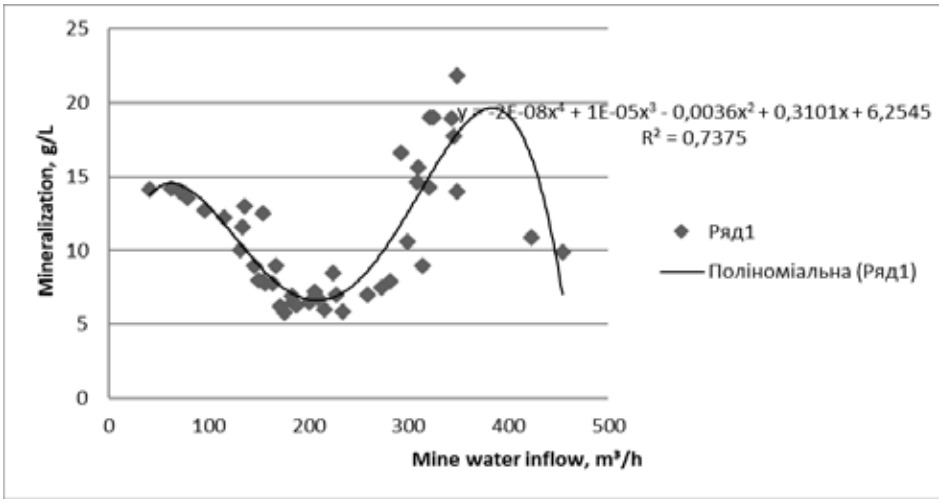


Fig. 6. Relationship between mine water inflow and mine water mineralization at the Dniprovska Mine

describe only the overall tendency of increasing mine water inflow (on average 6.7 m³/h per year) and mine water mineralization (approximately 0.09 g/L per year), but they do not adequately represent the evolution of the process. The best fit to the observed data is provided by third-order polynomial trend lines, with coefficients of determination of $R^2 = 0.7375$ for mine water inflow and $R^2 = 0.6855$ for mine water mineralization.

The shape of these trend curves indicates that the transformation of the hydrogeological system did not occur continuously but proceeded in distinct stages corresponding to the progressive development of mining operations and the sequential involvement of additional aquifers within the zone affected by mine dewatering.

Three principal stages of this process can be distinguished. The first stage (1975–mid-1980s) was characterized by relatively low mine water inflow (less than 100 m³/h) and comparatively low mine water mineralization (5.8–7.0 g/L). During this period, groundwater inflow originated predominantly from the Carboniferous aquifer system and the upper weakly mineralized aquifers.

The second stage (late 1980s–early 2000s) corresponded to the active expansion of the cone of depression. During this period, mine water inflow increased to 150–300 m³/h, while mineralization rose to 8–14 g/L, indicating the progressive involvement of groundwater from the Bucha and Obukhiv aquifers.

The third stage (after 2005) is characterized by the development of an integrated regional drainage system. Mine water inflow exceeded 300 m³/h, whereas mine water mineralization reached 20–22 g/L. These changes

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

indicate the intensive inflow of deep confined groundwater, enhanced hydraulic interaction between aquifers, and the increasing role of tectonically disturbed zones as preferential groundwater flow pathways.

The obtained results clearly demonstrate that prolonged mine operation leads not only to an increase in mine water inflow but also to a fundamental restructuring of the regional hydrodynamic system. The development of a regional cone of depression is accompanied by changes in groundwater flow directions, enhanced hydraulic connectivity between previously isolated aquifers, and the progressive involvement of deep, highly mineralized groundwater in the mine drainage system. These processes govern the present-day transformation of the hydrogeochemical regime of groundwater in the WD.

Conclusions. The present study provides a comprehensive assessment of the long-term transformation of the hydrodynamic and hydrogeochemical regimes of groundwater within the Pavlohrad–Petropavlivka coal mining district under conditions of prolonged coal mining. Analysis of monitoring data collected during 2010–2025, together with statistical processing of long-term observations, made it possible to identify the principal patterns of aquifer transformation induced by mine dewatering.

The results demonstrate that during the last fifteen years a system of local cones of depression has developed within the Paleogene aquifers in the central group of mines of the Western Donbas, with groundwater-level declines reaching 8 m, whereas the maximum decline within the Quaternary aquifer is approximately 2.5 m. The spatial distribution of these depression zones closely corresponds to the areas of the most intensive current mining activity.

For the first time within the study area, a comparative analysis of hydroisohypse maps for 2010 and 2025 has revealed fundamentally different responses of individual aquifer systems to anthropogenic loading. The Quaternary aquifer exhibits a regular groundwater-level decline spatially consistent with the hydrographic network, whereas the Buchak and Obukhiv aquifers Formations display an inversion of piezometric levels caused by the redistribution of groundwater flow and the transformation of natural recharge areas into zones of intensive anthropogenic drainage.

The study demonstrates that mine dewatering results not only in local groundwater-level decline but also in a comprehensive restructuring of the regional hydrodynamic system. The principal manifestation of this transformation is the change in groundwater flow patterns from predominantly lateral natural flow to vertically downward flow, which promotes the active involvement of confined groundwater from the Paleogene and Carboniferous deposits in the mine drainage system.

Analysis of long-term monitoring data from the Dniprovska Mine revealed a persistent simultaneous increase in mine water inflow and mine water mineralization. During the study period, the average mine water inflow increased by approximately 6.7 m^3/h per year, while the average mineralization increased by 0.09 g/L per year. The obtained correlation coefficient ($r = 0.29$) indicates a positive, although moderate, relationship between these variables, confirming the progressive involvement of more highly mineralized confined groundwater in the mine drainage system.

Temporal variations in both mine water inflow and mineralization are best described by third-order polynomial trends ($R^2 = 0.7375$ and $R^2 = 0.6855$, respectively), reflecting the stagewise evolution of the hydrogeological system. Three principal stages of this evolution were identified: the initial drainage of shallow aquifers, the progressive involvement of the Paleogene aquifer systems, and the present stage characterized by the intensive inflow of confined and more highly mineralized groundwater.

The obtained results indicate that prolonged coal mining in the Western Donbas is accompanied not only by the depletion of individual aquifers but also by enhanced hydraulic connectivity between aquifers, changes in groundwater flow directions, mixing of groundwater of different origins, and the development of new hydrogeochemical conditions within the anthropogenically transformed geological massif.

Prospects for the Application of the Research Results. The results obtained may be applied to predict the development of cones of depression and changes in the hydrogeochemical regime of groundwater at operating mines and prospective mining areas of the WD. The developed spatial models of groundwater-level changes and the identified patterns of hydrodynamic regime transformation can be used in the development of regional groundwater flow models, the assessment of groundwater resources, the prediction of mine water inflows, and the optimization of mine dewatering systems.

The practical significance of the study lies in the possibility of applying the identified patterns during environmental impact assessments, the planning of new mining blocks, the optimization of hydrogeological monitoring networks, and the development of environmental protection measures aimed at preserving groundwater resources in areas of intensive coal mining. A promising direction for future research is the integration of long-term monitoring data with GIS technologies and numerical modeling to develop a digital decision-support system for groundwater management in mining regions.

Література

1. Подрезенко І.Н., Краснопольський І.А. Фактори, що впливають на гідро геохімічний та гідрологічний режими гідросфери при експлуатації вугільних шахт Західного Донбасу. Екологія і природокористування, 2010, Вип. 13. – С. 155-163
2. Войтович С. Геохімічні особливості шахтних вод Червоноградського гірничопромислового району. Вісник Львівського університету. Серія геологічна, 2013, Вип. 27. – С. 138-145.
3. ЗУ «Про оцінку впливу на довкілля» ВВР, 2017, № 25, ст. 315. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19#Text
4. Садовенко І.О., Рудаков Д.В. Динаміка фільтраційного масопереносу при веденні й згортанні гірничих робіт: Монографія. – Д.: Національний гірничий університет, 2010. – 216 с.
5. Суярко В.Г. Гідрогеохімія (геохімія підземних вод): монографія – Харків, ХНУ ім. В.Н. Каразина, 2010. – 112 с.
6. Гідроекозахист вугільних шахтних полів: монографія / А.М. Загриценко, Ю.І. Демченко, В.О. Соцков, О.Р. Мамайкін ; за ред. І.О. Садовенка ; М-во освіти і науки України, НТУ «Дніпровська політехніка». – Дніпро : НТУ «ДП», 2018. – 114 с.
7. Westermann S., Rudakov D.V., Reker B., Melchers C. Ein neuer Blick auf Grubenwasseranstiegsprozesse – ausgewählte Beispiele aus dem deutschen Steinkohlenbergbau. – Markscheidewesen. 126(1), 2019.- P. 30-38.
8. Улицький О.А., Д'яченко Н.О., Бойко К.Е., Орловський А.В., Артеменко І.О., Зосима В.Г. Оцінювання екологічної небезпеки впливу шахтних вод ставка-накопичувача б. Таранова на водне середовище Західного Донбасу. Екологічні науки № 1(34), 2021. – P. 31-35 DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.7-34.6
9. Д'яченко Н.А. Особливості формування регіональних депресійних лійок у палеогенових відкладах під впливом шахтного осушення та водозабору (Західний Донбас). Наукові праці УкрНДМІ НАН України, 2013, № 12. – С. 291-305.
10. Вергельська В.В., Д'яченко Н.О. Результати кореляційного аналізу хімічного складу підземних вод (шахта Краснолиманська). Сучасні проблеми гірничої геології та геоекології: збірник матеріалів IV Міжнародної наукової конференції (Київ, 28 – 29 листопада 2023 р.). ДУ НЦ ГГГРІ НАН України: Київ, 2023. - С. 91-97
11. Tumane, R., Pingle, S., Jawade, A., Randive, K. Managing Water Quality in Mining Areas: Changing Paradigm of Sustainability. In: Randive, K., Pingle, S., Agnihotri, A. (eds) Innovations in Sustainable Mining. Earth and Environmental Sciences Library. Springer, Cham. 2021. – pp. 207-217. https://doi.org/10.1007/978-3-030-73796-2_12
12. Інтернет-ЗМІ «Українська енергетика ua-energy.org» ДТЕК: більше половини шахт Західного Донбасу працюватимуть мінімум до 2030 року. 2021. URL: https://ua-energy.org/uk/posts/dtek-bilshist-shakht-zakhidnoho-donbasu-pratsiuvatymut-minimum-do-2030-roku
13. Звіт з оцінки впливу на довкілля планованої діяльності «Розкриття та підготовка пластів $c_{10}^{в}$ і c_4 у блоках № 1а та № 2а з урахуванням нових технічних меж шахти «Самарська», розташованої в Павлоградському районі Дніпропетровської області. Реконструкція». Павлоград, 2024. - 188 с.
14. Інформаційний звіт про результати режимних гідрогеологічних спостережень по відомчій мережі спостережних свердловин. ПРАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» Дніпро: ТОВ «Укргеологія», 2025. - 13с.
15. Інформаційний звіт про результати режимних гідрогеологічних спостережень по відомчій мережі спостережних свердловин. ПРАТ «ДТЕК Павлоградвугілля». КП «Південукргеологія», Павлоград, 2012. — 59 с.
16. Безручко К., Д'яченко Н., Уразка М. Вплив зсувної дислокаційної зони Західного Донбасу на формування газових скупчень у вугленосних відкладах. Геодинаміка, 1 (24), 2018. – С. 27-39. https://doi.org/10.23939/jgd2018.01.027
17. Д'яченко Н.О, Привалов В.О. Тектонічна будова Західного Донбасу в контексті зсувоутворення. Наукові праці УкрНДМІ НАН України, № 5, ч. 2, 2009. – С. 67-91

Дата першого надходження статті до видання: 27.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

УДК 581.9-043.96:502.51(477.86-751)
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.21

РОСЛИННИЙ ПОКРИВ ЗСУВІВ НАЦІОНАЛЬНОГО ПРИРОДНОГО ПАРКУ «СИНЬОГОРА» (ГОРГАНИ)

Глушак Д.Д. (orcid.org/0009-0000-1940-9197)
Гнєзділова В.І. (orcid.org/0000-0002-3340-5747),
Різничук Н.І. (orcid.org/0000-0002-4863-6775)
Карпатський національний університет імені Василя Стефаника
вул. Галицька, 201Б, м. Івано-Франківськ
dmytro.hlushak.22@pnu.edu.ua, viktoriia.hniezdilova@cnu.edu.ua, nadiia.riznychuk@cnu.edu.ua

У статті наведено результати комплексного дослідження геоморфологічних характеристик, флористичного складу та особливостей природного відновлення рослинного покриву зсувних ділянок Національного природного парку «Синьогора». Метою роботи було встановлення взаємозв'язків між основними параметрами зсувних екотопів та структурою рослинного покриву, а також визначення напрямів його сукцесійної динаміки. Дослідження проведено у 2021 – 2025 рр. із використанням геоботанічних методів та аналізу зсувних ділянок.

У межах НПП «Синьогора» виявлено 14 зсувних ділянок загальною площею 35,2 га, розташованих на висотах 1110 – 1400 м н. р. м., за середньої крутості схилів близько 28°. Встановлено виражену приуроченість зсувів до холодних експозицій: 86 % досліджених ділянок розташовані на північних, північно-східних або північно-західних схилах. Показано, що експозиція, висота над рівнем моря, крутизна схилу, умови зволоження та стабільність субстрату визначають особливості формування та відновлення рослинного покриву. На зсувних екотопах виявлено 49 видів судинних рослин, серед яких переважають трав'янисті види та рослини-піонери відкритих порушених місцезростань. Важливою особливістю флори є наявність рідкісних видів, зокрема *Pinus cembra, Pinus mugo, Huperzia selago, Lilium martagon, Dactylorhiza fuchsii* та *Pseudorchis albida*.

На основі комплексного аналізу екологічних і геоморфологічних характеристик запропоновано екологічну типологію зсувних екотопів НПП «Синьогора». Встановлені типи відрізняються умовами терморегуляції та зволоження, стабільністю субстрату, характером рослинного покриву і напрямами сукцесійного розвитку. Отримані результати розширюють уявлення про роль природних зсувів у формуванні мозаїчності та флористичного різноманіття високогірних екосистем і можуть бути використані для моніторингу природної динаміки зсувних екотопів та оцінювання їх природоохоронної цінності. *Ключові слова:* зсувні екотопи, рослинний покрив, флора, сукцесія, природне відновлення, геоморфологічні чинники, високогір'я, Горґани, НПП «Синьогора», біорізноманіття

Vegetation of landslide ecotopes in "Synogora" National Nature Park (Gorgany mountains). Hlushak D., Gniezdilova V., Riznychuk N.

The article presents the results of a comprehensive study of the geomorphological characteristics, floristic composition, and natural vegetation recovery patterns of landslide sites within "Synogora" National Nature Park. The aim of the study was to determine the relationships between the main parameters of landslide ecotopes and vegetation structure, as well as to identify the patterns of successional dynamics. The study was conducted in 2021–2025 using geobotanical methods and an analysis of landslide sites.

Fourteen landslide sites with a total area of 35.2 ha were identified within "Synogora" National Nature Park. They are located at elevations ranging from 1,110 to 1,400 m a.s.l., with an average slope gradient of approximately 28°. A pronounced association of landslides with cool aspects was established: 86% of the studied sites are located on northern, northeastern, or northwestern slopes. The results demonstrate that slope aspect, elevation, slope gradient, moisture conditions, and substrate stability determine the characteristics of vegetation establishment and recovery. A total of 49 vascular plant species were recorded in the landslide ecotopes, with herbaceous species and pioneer plants characteristic of open, disturbed habitats predominating. An important feature of the flora is the presence of rare species, including *Pinus cembra, Pinus mugo, Huperzia selago, Lilium martagon, Dactylorhiza fuchsii*, and *Pseudorchis albida*.

Based on a comprehensive analysis of ecological and geomorphological characteristics, an ecological typology of landslide ecotopes within "Synogora" National Nature Park was proposed. The identified types differ in thermal and moisture regimes, substrate stability, vegetation structure, and successional trajectories. The results contribute to a better understanding of the role of natural landslides in shaping habitat heterogeneity and floristic diversity in high-mountain ecosystems and can be used for monitoring the natural dynamics of landslide ecotopes and assessing their conservation value. *Key words:* landslide ecotopes, vegetation cover, flora, succession, natural regeneration, geomorphological factors, high mountains, Gorgany Mountains, "Synogora" National Nature Park, biodiversity

© Глушак Д.Д., Гнєзділова В.І., Різничук Н.І., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. В умовах сучасних кліматичних змін, що супроводжуються трансформацією режиму снігового покриву, змінами кількості атмосферних опадів та підвищенням частоти екстремальних погодних явищ, активізація схилових процесів може істотно впливати на структуру та динаміку гірських екосистем. Зсуви є одним із важливих чинників природного порушення рослинного покриву, формування мозаїчності біотопів та розвитку відновних процесів, що зумовлює необхідність їх комплексного геоморфологічного та екологічного дослідження.

Територія НПП «Синьогора» лежить у межах Ґорґан – найвищого та найбільш скелястого сектора Зовнішніх (флішових) Українських Карпат. Геологічну основу становить крейдово-палеогеновий фліш Скибового покриву з переважанням потужношаруватих ямненських пісковиків, що чергуються з менш стійкими аргіліт-алевролітовими пачками. Саме таке перешаровування твердих пісковиків і пластичних глинистих порід, значна крутість схилів (переважно 25–35°), висока річна сума опадів (понад 1000–1400 мм) та інтенсивне сніготанення створюють у парку сприятливі передумови для розвитку сніголавинних (зсувних) процесів.

У флішових Ґорґанах формування зсувів визначається літологічною будовою схилу, орієнтуванням поверхонь нашарування відносно схилу та ступенем зволоження (Кравчук, 1999). За генетично-морфологічними ознаками для парку характерні такі типи:

– Консеквентні (пластові) зсуви – зміщення масиву відбувається вздовж поверхонь нашарування флішу, коли падіння пластів збігається з нахилом схилу; найпоширеніший тип у пісковиково-аргілітовому фліші.

– Інсеквентні зсуви – поверхня зриву перетинає нашарування; зумовлені перезволоженням глинистих прошарків та зривом кори звітрювання.

– Зсуви-потоки (деляпсивні) та опливини – поверхневі зміщення розрідженого делювію та кори звітрювання по схилу, часто у поєднанні із соліфлюкцією у приґрунтовому шарі; типові для крутих зволожених ділянок.

– Обвально-зсувні (детрузивні) комплекси – поєднання зсувного зміщення з осипанням та обвалюванням брил пісковику; часто межують із кам'янистими розсипами (ґреготами).

За глибиною захоплення порід переважають поверхневі та мілкі зсуви (потужність зміщеного тіла до 1–5 м), рідше трапляються глибші деляпсивні форми. За ступенем сучасної активності зсуви парку поділяються на активні (зі свіжими стінками відриву та оголеним мінеральним субстратом), тимчасово стабілізовані (частково задерновані) та стабілізовані (задерновані й закущені), що безпосередньо відображається в стадійності рослинного покриву.

Актуальність дослідження. Зсувні процеси є важливим чинником природного порушення рослинного покриву, проте водночас вони формують специфічні екотопи, у яких відбуваються закономірні процеси первинного та вторинного заростання, формування мозаїчних рослинних угруповань і відновлення лісової рослинності. Особливого значення набуває дослідження рослинного покриву зсувів у межах природоохоронних територій, де природні сукцесійні процеси можуть відбуватися за мінімального антропогенного впливу. НПП «Синьогора», розташований у межах високогірної частини Ґорґан, характеризується значною крутістю схилів, складною флішовою геологічною будовою, високим рівнем атмосферного зволоження та тривалим снігозаляганням, що створює специфічні умови для формування та розвитку зсувних екотопів.

Водночас зсувні ділянки можуть виконувати важливу функцію осередків флористичного різноманіття, зокрема забезпечувати існування видів-піонерів та рідкісних видів рослин. Тому комплексне вивчення взаємозв'язків між геоморфологічними характеристиками зсувів, структурою рослинного покриву та напрямами сукцесій є важливим для оцінювання сучасного стану гірських екосистем, розуміння закономірностей їх природного відновлення та забезпечення ефективного моніторингу природоохоронних територій.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження виконано в контексті сучасних наукових завдань, пов'язаних із вивченням природної динаміки гірських екосистем, закономірностей відновлення рослинного покриву на природно порушених субстратах та оцінюванням біорізноманіття природоохоронних територій. Авторський доробок спрямований на комплексне дослідження зсувних екотопів НПП «Синьогора» як специфічних компонентів високогірних екосистем, сформованих під впливом геоморфологічних процесів. У межах дослідження здійснено просторову та геоморфологічну характеристику 14 зсувних ділянок загальною площею 35,2 га, проаналізовано їх висотне положення, експозицію та крутість схилів, охарактеризовано флористичний склад і еколого-ценотичну структуру рослинного покриву. Отримані результати пов'язані із завданнями збереження біорізноманіття та природних процесів у межах природно-заповідного фонду України. Практичний напрям авторського доробку полягає у використанні отриманих результатів для оцінювання сучасного стану зсувних екотопів, організації моніторингу їх природної динаміки, оцінювання флористичної та природоохоронної цінності, а також обґрунтування необхідності збереження природних сукцесійних процесів на території НПП «Синьогора».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивченням рослинності гірських території та динаміки лісового покриву на зсувонебезпечних територіях Українських Карпат присвячено ряд нау-

кових статтей. Зокрема, Рущак В.О. та Чепурний І.В. (2025) досліджували просторово-часову динаміку лісового покриву упродовж 1990 – 2020 рр. Дослідження проведено на двох експериментальних ділянках у Закарпатській та Івано-Франківській областях із використанням супутникових знімків Landsat, платформи Google Earth Engine, геоінформаційного аналізу та вегетаційних індексів NDVI і NBR. Автори вказують, що Закарпатська ділянка характеризувалася вищим рівнем залісенення, але водночас і більшою кількістю зареєстрованих зсувів. Значна частина зсувів розташована поблизу ділянок із порушеним або деградованим лісовим покривом, особливо на межах лісових масивів. Автори роблять висновок, що стан рослинності не є єдиним чинником розвитку зсувів, проте може використовуватися як важливий просторовий індикатор зсувної небезпеки.

В іншій публікації Chepurnyi I., Rushchak V., Chepurna T. (2024) проаналізовано просторовий взаємозв'язок між поширенням зсувних ділянок і розподілом лісового покриву. Основна увага приділена виявленню особливостей розміщення зсувів у межах лісових масивів, на їхніх межах, а також на ділянках із порушеним або відсутнім рослинним покривом. Автори розглядають лісовий покрив не як самостійний причинний фактор утворення зсувів, а як один із компонентів комплексної системи природних та антропогенних чинників, до якої також належать рельєф, геологічна будова, гідрологічні умови та характер землекористування.

Elias R. B., Dias E. (2009) у своїй статті досліджують вплив гірських зсувів на динаміку, флористичний склад і структурну різноманітність рослинності на різних частинах зсувних ділянок, а саме, у верхній, середній та нижній частинах схилу. Автори виділили чотири стадії первинної сукцесії: піонерну стадію з домінуванням трав'яно-сфагнових угруповань *Festuca–Sphagnum*, стадію формування відкритих ялівцево-трав'яно-сфагнових чагарників, стадію розвитку ялівцево-сфагнових заростей і зрілу стадію ялівцево-сфагнового лісу. Найшвидше рослинність відновлюється в нижній частині зсуву, де формуються сприятливіші умови зволоження та накопичення дрібнозему. Дослідники дійшли висновку, що зсуви не лише порушують рослинний покрив, а й створюють мозаїку різновікових і різноструктурних угруповань, що сприяє збільшенню флористичного та ландшафтного різноманіття.

У статті Thapa P. S., Daimaru H., Yanai S. (2024) оцінено стан відновлення рослинності та розвиток ерозійних процесів через сім років після великого зсуву, який стався 2015 року в долині Сеннін на горі Хакусан у Центральній Японії. Автори встановили, що відновлення трав'янистої та деревної рослинності відбувалося переважно на верхній частині зсувного схилу. Натомість нижня частина схилу залишалася майже позбавленою рослинності й продовжувала зазнавати інтенсивного розмиву. Отримані результати свідчать, що цілеспрямоване відновлення рослинності, особливо з використанням місцевих видів, може істотно прискорити стабілізацію зсувних поверхонь і зменшити ерозійні процеси.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Незважаючи на значну кількість досліджень зсувних процесів у гірських екосистемах, значна увага в них зосереджена переважно на просторово-часовій динаміці лісового покриву, геоморфологічних передумовах виникнення зсувів. Водночас недостатньо дослідженими залишаються закономірності формування рослинного покриву природних зсувних екотопів високогірної частини Ґорґан за одночасного врахування їх висотного положення, експозиції та крутості схилів, умов зволоження. Зокрема, для території НПП «Синьогора» відсутня комплексна характеристика флористичного складу зсувних екотопів у поєднанні з їх геоморфологічними особливостями та оцінкою сукцесійних тенденцій. Окремою недостатньо опрацьованою проблемою є екологічна диференціація зсувних екотопів за умовами середовища та характером природного відновлення рослинності. Саме тому актуальним є комплексне дослідження зсувних екотопів НПП «Синьогора» з виділенням їх екологічних типів за сукупністю геоморфологічних характеристик, структури рослинного покриву та напрямів його природного відновлення.

Новизна. Вперше для території Національного природного парку «Синьогора» здійснено комплексну геоморфологічну та флористичну характеристику зсувних екотопів із одночасним аналізом особливостей природного відновлення рослинного покриву.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічне значення дослідження полягає у поєднанні геоморфологічного, флористичного та еколого-ценотичного підходів до оцінювання природно порушених екотопів гірських територій. Запропонований підхід дає змогу розглядати зсувні ділянки не лише як осередки геоморфологічної нестабільності, а як функціонально та екологічно диференційовані місцезростання, у яких формуються специфічні комплекси рослинних видів і відбуваються закономірні процеси природного відновлення.

Запропонована екологічна типологія може бути використана як методична основа для порівняльного аналізу зсувних екотопів у межах інших високогірних територій Українських Карпат, проведення довготривалого геоботанічного моніторингу та оцінювання напрямів природної сукцесії.

Виклад основного матеріалу. Метою нашої роботи було проведення геоморфологічного аналізу,

сучасного стану флори та сукцесій них процесів на зсувах на території НПП «Синьогора».

Дослідження проводилися на території НПП «Синьогора» протягом 2021 – 2025 років. Використовувались загальноприйняті методи геоботанічних досліджень (Григора І.М., Соломаха В.А. (2004) [6]. Рослини визначались за "Флора Українських Карпат" (Чопик В.І., Федорончук М.М. (2015) [7].

У складі нелісових земель парку як окрему категорію «ЗСУВИ» виділено 14 таксаційних виділів загальною площею 35,2 га, розподілених між двома природоохоронними науково-дослідними відділеннями (ПОНДВ) – Межиріцьким (5 виділів, 14,7 га) та Сивульським (9 виділів, 20,5 га). Середня площа окремого зсуву становить 2,5 га (від 0,6 до 4,7 га), середня висота розташування – близько 1282 м н.р.м. (діапазон 1110–1400 м), середня крутість схилу – 28°. Абсолютна більшість зсувів (12 із 14, або 86 %) приурочена до схилів холодних північних експозицій (Пн, ПнС, ПнЗ), що зумовлює тривале снігозалягання, підвищену зволоженість субстрату та уповільнене відновлення рослинного покриву.

У розрізі функціонального зонування 6 зсувів (12,8 га) розташовані в заповідній зоні, де діють процеси природного самозаростання без господарського втручання, а 8 зсувів (22,4 га) – у зоні регульованої рекреації. Такий розподіл робить зсуви парку зручним модельним об'єктом для порівняльного вивчення первинних і вторинних сукцесій на природно порушених субстратах високогір'я.

Рослинний покрив зсувів НПП «Синьогора» визначається комплексом геоморфологічних факторів, серед яких провідне значення мають експозиція схилу, висота над рівнем моря, крутість схилу та функціональне зонування території (табл. 1).

Зсуви Межиріцького ПОНДВ

Зсув 1 (кв. 22, вид. 28; 3,7 га). Найбільший зсув Межиріцького масиву, розташований на північно-східному схилі крутістю 30° на висоті 1110 м у зоні регульованої рекреації. Помірна для парку висота і відносно тепліша північно-східна експозиція сприяють активнішому заростанню: поряд із трав'яно-папоротевими піонерами тут закріплюються верби, береза та підріст ялини.

Зсув 2 (кв. 22, вид. 29; 0,9 га). Малий за площею, але найвисокогірніший зсув відділення (1400 м), північна експозиція, крутість 30°. Холодні умови й тривале снігозалягання уповільнюють сукцесію; переважає розріджений трав'яно-чагарничковий покрив із фрагментами жерепу на верхній межі.

Зсув 3 (кв. 23, вид. 18; 3,5 га). Північний схил 30° на висоті 1250 м у заповідній зоні. Розвивається за сценарієм суто природного самозаростання; характерні папоротеві зарості та поодинокий підріст ялини й горобини.

Зсув 4 (кв. 23, вид. 19; 4,7 га). Найбільший зсув усього парку (4,7 га), суміжний зі зсувом 3, північна експозиція, 30°, 1250 м, заповідна зона. Значна площа й неоднорідність субстрату зумовлюють мозаїчність покриву – від оголених ділянок відриву до задернованих і закущених фрагментів.

Зсув 5 (кв. 23, вид. 13; 1,9 га). Північно-східний схил 30° на висоті 1300 м, заповідна зона. Помірно зволожений субстрат сприяє розвитку папоротево-різнотравних угруповань із участю рідкісних видів приполонинної смуги.

Зсуви Сивульського ПОНДВ

Зсув 6 (кв. 4, вид. 45; 1,1 га). Північний схил крутістю 25° на висоті 1310 м, зона регульованої рекреації. Порівняно пологий субстрат сприяє швидшому задернуванню злаками та ситниками.

Таблиця 1

Таксаційно-геоморфологічна характеристика зсувів НПП «Синьогора»

№	ПОНДВ	Кв./вид.	Площа, га	Експо-зиція	Крут.,°	Висота, м	Зона
1	Межиріцьке	22 / 28	3,7	ПнС	30	1110	рег. рекреації
2	Межиріцьке	22 / 29	0,9	Пн	30	1400	рег. рекреації
3	Межиріцьке	23 / 18	3,5	Пн	30	1250	заповідна
4	Межиріцьке	23 / 19	4,7	Пн	30	1250	заповідна
5	Межиріцьке	23 / 13	1,9	ПнС	30	1300	заповідна
6	Сивульське	4 / 45	1,1	Пн	25	1310	рег. рекреації
7	Сивульське	4 / 23	1,8	Пн	30	1350	рег. рекреації
8	Сивульське	31 / 10	4,3	ПдС	25	1330	заповідна
9	Сивульське	26 / 15	3,4	ПнЗ	35	1220	заповідна
10	Сивульське	23 / 41	2,5	ПнС	30	1340	заповідна
11	Сивульське	23 / 36	2,0	ПнС	25	1280	рег. рекреації
12	Сивульське	4 / 33	0,6	ПнС	30	1350	рег. рекреації
13	Сивульське	4 / 14	2,5	ПнС	25	1260	рег. рекреації
14	Сивульське	4 / 17	2,3	ПнС	25	1200	рег. рекреації

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

Зсув 7 (кв. 4, вид. 23; 1,8 га). Північна експозиція, 30°, 1350 м. Крутіший і вологіший схил із переважанням папоротевих піонерів і фрагментарним підростом ялини.

Зсув 8 (кв. 31, вид. 10; 4,3 га). Один із найбільших зсувів відділення й єдиний із південною (ПдС) експозицією; крутість 25°, висота 1330 м, заповідна зона. Тепліші й сухіші умови південного схилу визначають більшу участь світлолюбного різнотрав'я та чагарничків (*Vaccinium myrtillus*, *Vaccinium vitis-idaea*).

Зсув 9 (кв. 26, вид. 15; 3,4 га). Найкрутіший зсув парку (35°), північно-західна експозиція, 1220 м, заповідна зона. Значна крутість підтримує активність зсувного процесу, оголеність мінерального субстрату та слабку задернованість.

Зсув 10 (кв. 23, вид. 41; 2,5 га). Північно-східний схил 30° на висоті 1340 м, заповідна зона. Розвивається за природним сценарієм; характерні папоротево-різнотравні угруповання.

Зсув 11 (кв. 23, вид. 36; 2,0 га). Північно-східна експозиція, помірна крутість 25°, 1280 м, зона регульованої рекреації. Заростання просунуте – переважають задерновані ділянки з участю чагарничків *Vaccinium myrtillus* та злаково-різнотравного покриву.

Зсув 12 (кв. 4, вид. 33; 0,6 га). Найменший зсув парку (0,6 га), північно-східний схил 30°, 1350 м, зона регульованої рекреації. Невелика площа сприяє швидкому крайовому заростанню з прилеглих деревостанів.

Зсув 13 (кв. 4, вид. 14; 2,5 га). Північно-східна експозиція, 25°, 1260 м, зона регульованої рекреації. Помірні умови зволоження й пологість зумовлюють поступове формування трав'яно-чагарничкового покриву з підростом ялини.

Зсув 14 (кв. 4, вид. 17; 2,3 га). Найнижчий за розташуванням зсув відділення (1200 м), північно-східний схил 25°, зона регульованої рекреації. Найсприятливіші термічні умови серед сивульських зсувів забезпечують найактивніше лісовідновлення.

Переважна більшість зсувів (86 %) розташована на схилах північної, північно-східної або північно-західної експозицій. Такі ділянки характеризуються тривалішим снігозаляганням, підвищеним зволоженням та нижчими температурами, що уповільнює перебіг сукцесійних процесів. На них домінують папоротево-різнотравні угруповання, піонерні деревні породи та підріст ялини. Єдиний зсув південної експозиції (№ 8) відрізняється більшою участю світлолюбних видів, насамперед чорниці (*Vaccinium myrtillus*), брусниці (*Vaccinium vitis-idaea*) та різнотрав'я, що пов'язано з кращим прогріванням субстрату та меншою його зволоженістю.

Найвисокогірніший зсув (1400 м) характеризується найповільнішим відновленням рослинності. Тут переважають розріджені трав'яно-чагарничкові угруповання та жереп, що свідчить про вплив суворих кліматичних умов високогір'я. Натомість на нижчих висотах (1110–1200 м) формуються сприятливіші умови для розвитку деревної рослинності, що проявляється інтенсивнішим заростанням березою, вербами та ялиною.

Найкрутіший зсув (35°) характеризується постійною активністю геоморфологічних процесів, значною оголеністю мінерального субстрату та слабким розвитком рослинного покриву. Навпаки, на схилах крутістю 25° швидше формується суцільний трав'яний покрив, активно розвиваються злаки, ситники та чагарнички, що сприяє стабілізації поверхні.

У заповідній зоні розвиток рослинності відбувається винятково природним шляхом без антропогенного втручання. Тут добре простежуються природні сукцесії від піонерних стадій до формування молодих деревостанів. У зоні регульованої рекреації процеси відновлення також інтенсивні, однак потенційно зазнають впливу рекреаційного навантаження.

На підставі комплексного аналізу висоти над рівнем моря, експозиції та крутості схилів, особливостей зволоження і стабільності субстрату, а також характеру рослинного покриву запропоновано екологічну типологію зсувних екотопів НПП «Синьогора» (табл. 2). Виділені типи відображають відмінності екологічних умов та характеру відновлення рослинності зсувів.

Рослинний покрив зсувів парку має виразно піонерний, ранньосукцесійний характер і формується на оголеному або слабозадернованому колювіальному субстраті. Флористичне ядро становлять світлолюбні види-піонери відкритих порушених місцезростань, які поступово змінюються лісовідновними породами. У ході геоботанічного обстеження зсувів зафіксовано 49 видів судинних рослин (табл. 3), які за екологічно-ценотичною роллю об'єднуються в кілька груп.

Деревно-чагарникові піонери та лісовідновний підріст. Заростання зсувів починають світлолюбні деревні породи – *Betula pendula*, *Salix caprea*, *Salix cinerea*, *Alnus incana*, *Sorbus aucuparia*, які закріплюють субстрат і формують перший намет. За ними у нижньому та середньому поясі оселяється підріст *Picea abies*, а на верхніх, скелястих частинах – *Pinus mugo* сосна гірська (жереп) і поодиноко *Pinus cembra* (сосна кедрова європейська).

Трав'яні та папоротеві піонери. Оголений мінеральний ґрунт активно колонізують *Chamaenerion angustifolium*, *Petasites albus*, кореневищні папороті (*Athyrium filix-femina*, *Dryopteris filix-mas*, *Dryopteris dilatata*, *Oreopteris limbosperma*, *Blechnum spicant*), а також злаки (*Calamagrostis*-угруповання, *Festuca supina*, *Holcus lanatus*, *Poa chaixii*) та ситники *Luzula sylvatica* і *Luzula luzuloides*.

Раритетна складова. Особливу природоохоронну цінність зсувів як осередків рідкісних видів становлять занесені до Червоної книги України *Huperzia selago, Lycopodium annotinum, Lilium*

Таблиця 2

Екологічна типологія зсувних екотопів НПП «Синьогора»

№ з\п	Екологічний тип зсувних екотопів	Основні екологічні характеристики	Характер рослинного покриву	Сукцесійна тенденція	Номер зсуву
1	Високогірні холодні зсувні екотопи	Висота 1300-1400 м н.р.м.; переважно північна та північно-східна експозиція; тривале снігозалягання; підвищене зволоження; крутизна схилу 30°	Розріджений трав'яно-чагарничковий покрив; папороті; *Pinus mugo*; фрагментарний підріст *Picea abies*	Уповільнене природне відновлення	2, 5, 7, 10, 12
2	Помірно стабілізовані зсувні екотопи	Висота 1200-1300 м; крутизна 25-30°; помірне зволоження; частково стабілізований субстрат	Папоротево-різнотравні угруповання; злаки; ситники; береза, верби, горобина; підріст ялини	Активне заростання та поступовий перехід до лісовідновної стадії	1, 3, 4, 6, 9, 13
3	Стабілізовані зсувні екотопи з вираженим лісовідновленням	Висота 1200-1280 м; крутизна 25°; відносно стабільний субстрат; сприятливіші термічні умови	Задернований трав'яно-різнотравний покрив; чагарнички *Vaccinium*; підріст *Picea abies*; деревні піонери	Просунута стадія природного відновлення та лісоформування	11, 14
4	Теплий південно-східний зсувний екотоп	Південно-східна експозиція; 1330 м; крутизна 25°; вищий рівень сонячної радіації; тепліші та сухіші умови порівняно з північними експозиціями	Світлолюбне різнотрав'я; *Vaccinium myrtillus*, *V. vitis-idaea*; чагарнички	Специфічна траєкторія відновлення, зумовлена експозиційним мікрокліматом	8

Таблиця 3

Конспект флори зсувів НПП «Синьогора»

№ з\п	Українська назва	Латинська назва	Еколого-ценотична група	Природо-охоронний статус
1	Ялина європейська	*Picea abies* (L.) Karst	дерево, підріст	–
2	Береза повисла	*Betula pendula* Roth.	дерево, піонер	
3	Горобина звичайна	*Sorbus aucuparia* L.	дерево, піонер	–
4	Сосна кедрова європейська	*Pinus cembra* L.	дерево	ЧКУ
5	Верба козяча	*Salix caprea* L.	кущ, піонер	–
6	Верба попеляста	*Salix cinerea* L.	кущ, піонер	–
7	Вільха сіра	*Alnus incana* (L.) Moench	дерево, піонер	–
8	Сосна гірська (жереп)	*Pinus mugo* Turra	сланкий кущ	ЧКУ
9	Чорниця	*Vaccinium myrtillus* L.	напівкущ	–
10	Брусниця	*Vaccinium vitis-idaea* L.	напівкущ	–
11	Малина звичайна	*Rubus idaeus* L.	напівкущ, піонер	–
12	Ожина складчаста	*Rubus plicatus* Weihe et Neec	напівкущ	–
13	Ожина несійська	*Rubus nessensis* Hall	напівкущ	–
14	Ожина шорстка	*Rubus hirtus* Waldst	напівкущ	–
15	Анемона дібровна	*Anemone nemorosa* (L.) Holub	трав’яний, дводольний	–
16	Безщитник жіночий	*Athyrium filix-femina* (L.) Roth	папороть	–
17	Щитник чоловічий	*Dryopteris filix-mas* (L.) Schott	папороть	–
18	Щитник австрійський	*Dryopteris dilatata* (Hoffm) A. Gray	папороть	–
19	Гірська папороть	*Oreopteris limbosperma* (All) Holub	папороть	–

ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

Закінчення табл. 2

№ з\п	Українська назва	Латинська назва	Еколого-ценотична група	Природо-охоронний статус
20	Багаторядник шипуватий	*Polystichum aculeatum* (L.) Roth	папороть	–
21	Блехнум колосистий	*Blechnum spicant* (L.) Sm.	папороть	–
22	Герань лісова	*Geranium sylvaticum* L.	трав'яний, дводольний	–
23	Ожика лісова	*Luzula sylvatica* Gaudin	трав'яний, однольний	–
24	Ожика гайова	*Luzula luzuloides* (Lam.) Dandy	трав'яний, однольний	–
25	Осока звисла	*Carex pendula* Huds.	трав'яний, однольний	–
26	Осока кульконосна	*Carex pilulifera* L.	трав'яний, однольний	–
27	Осока заяча	*Carex leporina* L.	трав'яний, однольний	–
28	Будяк лопуховий	*Carduus personata* (L.) Jacq	трав'яний, дводольний	–
29	Костриця лежача	*Festuca supina* L.	трав'яний, однольний	–
30	Медова трава вовниста	*Holcus lanatus* L.	трав'яний, однольний	–
31	Тонконіг карпатський	*Poa chaixii* Vill.	трав'яний, однольний	–
32	Зніт гірський	*Epilobium montanum* L.	трав'яний, дводольний	–
33	Зніт вузьколистий (хамерій)	*Chamaenerion angustifolium* L.	трав'яний, піонер	–
34	Молочай мигдалелистий	*Euphorbia amygdaloides* L.	трав'яний, дводольний	–
35	Кремена біла	*Petasites albus* (L.) Gaertn	трав'яний, піонер	–
36	Чемериця біла	*Veratrum album* L.	трав'яний, дводольний	–
37	Підбілик альпійський	*Homogyne alpina* (L.) Cass	трав'яний, дводольний	–
38	Сольданела угорська	*Soldanella hungarica* Simonk	трав'яний, дводольний	–
39	Звіробій плямистий	*Hypericum maculatum* Crantz	трав'яний, дводольний	–
40	Перстач золотистий	*Potentilla aurea* L.	трав'яний, дводольний	–
41	Перстач прямостоячий	*Potentilla erecta* L.	трав'яний, дводольний	–
42	Зубниця залозиста	*Dentaria glandulosa* Waldst. et Kit.	трав'яний, дводольний	–
43	Тирлич ваточниковий	*Gentiana asclepiadea* L.	трав'яний, дводольний	–
44	Хвощ польовий	*Equisetum arvense* L.	хвощеподібні	–
45	Плаун річний	*Lycopodium annotinum* L.	плауноподібні	Берн. конв.
46	Баранець звичайний	*Huperzia selago* L.	плауноподібні	ЧКУ
47	Лілія лісова	*Lilium martagon* L.	трав'яний, однольний	ЧКУ
48	Зозульки Фукса	*Dactylorhiza fuchsii* (Druce) Soo	трав'яний, однольний	ЧКУ; CITES II
49	Псевдоорхіс білуватий	*Pseudorchis albida* L.	трав'яний, однольний	ЧКУ; CITES II

martagon, Pinus cembra, Pinus mugo, а також орхідні *Dactylorhiza fuchsii, Pseudorchis albida,* що додатково охороняються Конвенцією CITES [8]. Наявність цих видів підкреслює, що зсуви є не деградованими, а флористично збагаченими біотопами відкритого високогір'я.

Систематичний аналіз флори показав, що найбільшою кількістю видів представлені покритонасінні рослини – 37 видів від загальної кількості (однодольних виявлено 11 видів, а дводольних – 26 видів) (*Lilium martagon, Potentilla aurea, Poa chaixii, Anemone nemorosa, Geranium sylvaticum* та ін.). Другою за чисельністю групою є папоротеподібні, які представлені 6 видами (*Athyrium filix-femina, Oreopteris limbosperma, Blechnum spicant та ін.)*. Голонасінних налічується 3 види, плаунів – два, а хвощів – лише один вид (*Equisetum arvense)*.

Біоморфологічний аналіз засвідчив, що найбільшу групу становлять трав'янисті рослини – 35 видів (*Potentilla aurea, Geranium sylvaticum, Lycopodium annotinum, Lilium martagon* та інші). Значно менш чисельною групою представлені напівкущі – 6 видів (*Vaccinium myrtillus, Rubus hirtus* та інші) та дерева – 5 видів (*Picea abies, Sorbus aucuparia, Alnus incana* та ін.). Найменшу групу становлять кущі – 3 види (*Salix caprea, Salix cinerea, Pinus mugo*).

Головні висновки. На території НПП «Синьогора» виявлено 14 зсувних ділянок загальною площею 35,2 га, розташованих на висотах 1110–1400 м н.р.м. за середньої крутості схилів близько 28°. Переважна їх частина (86 %) приурочена до північних, північно-східних та північно-західних експозицій, що визначає специфічні умови зволоження, температурного режиму та тривалості снігового покриву. Флора досліджених зсувів представлена 49 видами судинних рослин, серед яких переважають трав'янисті види та піонерні рослини відкритих порушених місцезростань. Важливою особливістю флори є наявність видів із природоохоронним статусом, зокрема *Pinus cembra, Pinus mugo, Huperzia selago, Lilium martagon, Dactylorhiza fuchsii* та *Pseudorchis albida*. Експозиція, висота над рівнем моря та крутість схилу є основними просторовими чинниками, з якими пов'язані відмінності рослинного покриву зсувів. За комплексом екологічних характеристик зсувні ділянки можна диференціювати на кілька екологічних типів, що відрізняються умовами терморегуляції, зволоження, стабільності субстрату та характером відновлення рослинності.

Зсувні ділянки НПП «Синьогора» мають важливе природоохоронне значення, оскільки, незважаючи на природне порушення субстрату, підтримують осередки флористичного різноманіття та створюють специфічні умови для існування раритетних видів рослин.

Перспективи використання результатів дослідження. Запропонована екологічна типологія зсувних екотопів може бути використана як основа для подальшого моніторингу природної динаміки зсувних ділянок НПП «Синьогора» та оцінювання напрямів відновлення їх рослинного покриву.

Результати дослідження доцільно застосовувати під час оцінювання флористичної та природоохоронної цінності зсувних екотопів, зокрема для виявлення і контролю стану місцезростань рідкісних та охоронюваних видів рослин. Особливого значення це набуває в умовах природоохоронного режиму території, де збереження природних сукцесійних процесів є важливою складовою підтримання природної динаміки гірських екосистем. Перспективним напрямом подальших досліджень є проведення довготривалого моніторингу виділених типів зсувних екотопів із повторним геоботанічним обстеженням, що дасть змогу простежити реальну динаміку видового складу, структури рослинного покриву та переходів між сукцесійними стадіями. Отримані матеріали можуть бути використані для формування системи екологічного моніторингу природно порушених екотопів високогір'я.

Література

1. Кравчук Я. С. Геоморфологія Передкарпаття. Львів: Меркатор, 1999. 188с. https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-geomorfologiyapredkarpatya.pdf
2. Рущак В.О., Чепурний І.В. Оцінка динаміки лісового покриву зсувонебезпечних територій Українських Карпат із використанням платформи Google Earth Engine. *Екологічні науки.* 2025. № 2(59), С. 146 – 151. https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.2-59.22 (дата звернення 30.07.2026).
3. Chepurnyi I., Rushchak V., Chepurna T. Spatial analysis of the relationship between the distribution of landslide areas and forest cover. International Conference of Young Professionals *GeoTerrace-2024*. 2024. P. 1 – 5 https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510017 (дата звернення 01.08.2026).
4. Elias R. B., Dias E. Effects of landslides on the mountain vegetation of Flores Island, Azores. *Journal of Vegetation Science.* 2009. № 20(4), P. 706 – 717. https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2009.01070.x (дата звернення 30.07.2026).
5. Thapa P. S., Daimaru H., Yanai S. Analyzing vegetation recovery and erosion status after a large landslide at Mt. Hakusan, Central Japan. *Ecological Engineering.* 2024. Vol. 198 (4). https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.107144 (дата звернення 02.08.2026).
6. Григора І.М., Соломаха В.А. Основи фітоценології. Київ: Фітосоціоцентр, 2004. 345 с.
7. Чопик В.І., Федорончук М.М. Флора Українських Карпат. Тернопіль: Терно-граф, 2015. 712 с.
8. Червона книга України. Рослинний світ / за ред. Я. П. Дідуха. Київ: Глобалконсалтинг, 2009. 900 с.

Дата першого надходження статті до видання: 24.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

УДК 556.5:627.152:551.583:504.4:628.336
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.22

ПРОЦЕСИ МЕХАНІЧНОЇ ДЕНУДАЦІЇ СХИЛОВИХ ТЕРИТОРІЙ УКРАЇНСЬКИХ КАРПАТ В БАСЕЙНІ ДНІСТРА

Гнатів І.Р. (orcid.org/0000-0002-2987-1673)
Національний лісотехнічний університет України
вул. Генерала Чупринки, 134, 79057, м. Львів
gnativ13@gmail.com

Для гірських геосистем Карпат характерна висока інтенсивність ерозійно-денудаційних процесів, які виступають визначальним чинником сучасного рельєфогенезу та суттєво впливають на екологічний стан суміжних територій. Механічна денудація супроводжується транзитним переміщенням значних масивів уламкового матеріалу схиловими профілями з подальшим його акумулюванням у басейнових зниженнях або безпосереднім надходженням до руслової мережі.

В роботі проведено синхронний аналіз хронологічних рядів опадів, витрат води та стоку завислих наносів уздовж поздовжнього профілю Дністра за розширений часовий період (1947–2025 рр.). Уточнено просторово-часову специфіку перерозподілу твердого стоку між весняним та літньо-осіннім періодами за впливу сучасних кліматичних змін, а також виявлено контрастні седиментаційні режими для карпатської та подільської частин басейну.

Методологічна цінність статті полягає у застосуванні підходу синхронного зіставлення гідрометеорологічних та седиментаційних параметрів для оцінки стійкості річкових геосистем. Запропонована методика дозволяє підвищити точність прогнозування ерозійно-денудаційних процесів і руслових деформацій у басейнах гірських та рівнинних річок в умовах кліматичних трансформацій.

Виявлено міжсезонну зміну структури стоку наносів в умовах кліматичних трансформацій. Доведено наявність тісного кореляційного зв'язку між опадами, витратами води та стоку завислих наносів у весняний період уздовж усієї течії Верхнього Дністра. Встановлено просторову контрастність седиментаційних режимів: правобережні (карпатські) притоки демонструють високий ерозійний потенціал та переважання розмивів, тоді як для лівобережних (подільських) характерні помірніші показники з акумуляцією наносів на Західному Поділлі і зростанням ерозії на Східному Поділлі. *Ключові слова:* схилові території, механічна денудація, ерозійні процеси, стік наносів, зміни клімату, басейн Дністра.

Processes of mechanical denudation in the slope areas of the Ukrainian Carpathians within the Dniester basin Hnativ I.

Mountain geosystems of the Carpathians are characterized by a high intensity of erosion-denudation processes, which act as a key factor in contemporary relief formation and significantly affect the ecological state of adjacent territories. Mechanical denudation is accompanied by the transit movement of substantial volumes of clastic material along slope profiles, with its subsequent accumulation in basin depressions or direct input into the channel network.

This paper provides a synchronous analysis of chronological series of precipitation, water discharge, and suspended sediment yield along the longitudinal profile of the Dniester River over an extended period (1947–2025). The spatiotemporal specifics of sediment redistribution between the spring and summer-autumn periods under the impact of modern climate change were clarified, and contrasting sedimentation regimes were identified for the Carpathian and Podolian parts of the basin.

The methodological value of the article lies in applying a synchronous comparison approach of hydrometeorological and sedimentation parameters to assess the stability of river geosystems. The proposed methodology enhances the forecasting accuracy of erosion-denudation processes and channel deformations in the basins of mountain and lowland rivers under climate transformation conditions.

A seasonal shift in the structure of sediment yield under climate transformation was identified. A strong correlation was proven between precipitation, water discharge, and suspended sediment yield during the spring period along the entire course of the Upper Dniester. Spatial contrast in sedimentation regimes was established: right-bank (Carpathian) tributaries demonstrate high erosional potential and a predominance of scouring, whereas left-bank (Podolian) tributaries show more moderate values, with sediment accumulation in Western Podolia and increasing erosion in Eastern Podolia. *Key words:* slope areas, mechanical denudation, erosion processes, sediment yield, climate change, Dniester basin.

Постановка проблеми. У межах басейну річки Дністер поєднуються дві виразні геоморфологічні області – Карпатська гірська система та Передкарпатська рівнина, що чітко відображено на картах геоморфологічного районування. Еволюція рельєфу, морфогенез річкових долин, формування терасних комплексів і закономірності перебудови гідрографічної мережі цього регіону протягом тривалого часу перебували в центрі уваги багатьох вітчизняних і зарубіжних науковців [1–5].

Водночас починаючи з другої половини XX століття та впродовж перших десятиліть XXI ст. у Карпатському регіоні спостерігається суттєва активізація деструктивних гідрологічних і геоморфо-

© Гнатів І.Р., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

логічних явищ. Найбільшу загрозу такі небезпечні процеси становлять у зонах, де природні передумови їхнього виникнення суттєво посилюються під впливом антропогенного навантаження.

Для гірських геосистем Карпат характерна висока інтенсивність ерозійно-денудаційних процесів, які виступають визначальним чинником сучасного рельєфогенезу та суттєво впливають на екологічний стан суміжних територій. Механічна денудація супроводжується транзитним переміщенням значних масивів уламкового матеріалу схиловими профілями з подальшим його акумулюванням у басейнових пониженнях або безпосереднім надходженням до руслової мережі. Окрім прямої деструкції ґрунтового покриву, цей процес зумовлює деградацію якості поверхневих вод: мінеральні частки підвищують каламутність потоків і є сорбентами для радіонуклідів та важких металів [6, 7].

Актуальність дослідження З огляду на це, систематичний моніторинг стоку наносів є важливою ланкою гідрологічних спостережень у загальнодержавній системі контролю довкілля. Первинна інформаційна база формується мережею гідрометричних постів, де визначаються ключові якісні та кількісні показники: каламутність води, стік та модуль стоку завислих часток, а також гранулометричний склад завислого й донного матеріалу [6, 8].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Робота виконана згідно плану науково-дослідної роботи кафедри гідротехніки та водної інженерії НУ «Львівська політехніка» з проблеми «Процеси перенесення маси та трансформації русел річок Прикарпаття» відповідно до науково-технічної програми Міністерства освіти і науки України. Результати узгоджуються із завданнями Водної стратегії України щодо оцінки геоекологічного стану річкових басейнів, протидії ерозійним процесам та мінімізації наслідків паводкової небезпеки у Карпатському регіоні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій Систематичний моніторинг транспортування як завислої, так і донної складових твердого стоку в басейновій геосистемі Верхнього Дністра бере свій початок ще з середини XX століття. Надалі ця проблематика дістала всебічне висвітлення й деталізацію у фундаментальних працях І. П. Ковальчука [9, 10], О. В. Пилипович [6, 11], В. І. Вишневського [8], М. М. Сусідка і О. І. Лук'янець [12]. Зокрема, специфіку внутрішньорічної динаміки водності та стоку наносів для лівобережних приток Дністра детально дослідив В. В. Гребінь [13]. За його даними, зіставляючи часовий проміжок 1983–2000 рр. із періодом до 1982 року, фіксується скорочення весняної частки твердого стоку на 12,5 %, яке супроводжувалося його зростанням у літньо-осінній період (до 4,8 %).

Така міжсезонна перебудова осадового стоку безпосередньо зумовлена трансформацією кліматичних умов – передусім формуванням малосніжних, м'яких зим та підвищенням зволоженості влітку. Унаслідок цих чинників фаза весняного водопілля втрачає чітку морфологічну вираженість і перестає супроводжуватися стрибкоподібним підйомом водності. Багаторічну динаміку стоку наносів у річкових мережах верхньої частини басейну Дністра, а також причини та геоекологічні наслідки її трансформації дослідили І.П. Ковальчук та А. Б. Михнович. Автори наголосили на критичній потребі розширення часових рядів гідрометричних спостережень для об'єктивного оцінювання подальшого транспортування наносів у басейні [7, 14].

Аналіз залежностей між ключовими морфодинамічними параметрами русел дав можливість О. Г. Ободовському і З. О. Розлач встановити просторові закономірності розвитку вертикальних руслових деформацій у басейні Верхнього та Середнього Дністра. Науковці з'ясували, що сам Дністер та його правобережні притоки характеризуються вираженим переважанням ерозійних процесів та розмивів, тоді як у руслах лівобережних водотоків фоновим режимним процесом є акумуляція наносів. Оцінка стійкості русел та аналіз гранулометрії руслоформувальних відкладів [15] підтвердили цей контраст: якщо у правобережній мережі спостерігається зсув у бік збільшення крупності донних наносів, то для лівобережних приток властиве поступове зменшення середнього діаметра руслового алювію.

На основі хронологічного аналізу часової динаміки денудаційних процесів у басейнових геосистемах О. В. Пилипович виокремила два виразні етапи. Перший із 1963–1980 рр. відзначився аномально високими показниками стоку завислих наносів у карпатських водозборах, що стало безпосереднім наслідком масштабного вирубування лісових масивів наприкінці 1960-х – у середині 1970-х років. Натомість другий етап (1980–2012 рр.) демонстрував неоднорідну просторову тенденцію: до 1996 року інтенсивність денудації на водозборах карпатських приток Дністра спадала, але водночас у басейнових геосистемах Прикарпаття зафіксовано її деяке зростання. Відновлення та подальше розширення масштабів лісорозробок після 1996 р. викликало повторний сплеск активності ерозійних процесів (рис. 1) [6, 16].

Визначальною рисою транспортування завислого матеріалу є його висока внутрішньорічна нерівномірність. Переважна частина річного обсягу стоку наносів продукується за фаз весняного водопілля та зливових паводків. При цьому частка весняного водопілля у загальному багаторічному балансі твердого стоку неухильно скорочується – від 60 % у минулому до 20 % і продовжує зменшуватись на сучасному етапі. Ця виражена спадна тенденція останніми роками зумовлена поєднанням двох основних чинників: пом'якшенням умов зимового періоду (зменшенням снігонакопичення) з одного боку, та зростанням інтенсивності зливових опадів у теплий сезон – з іншого [10].

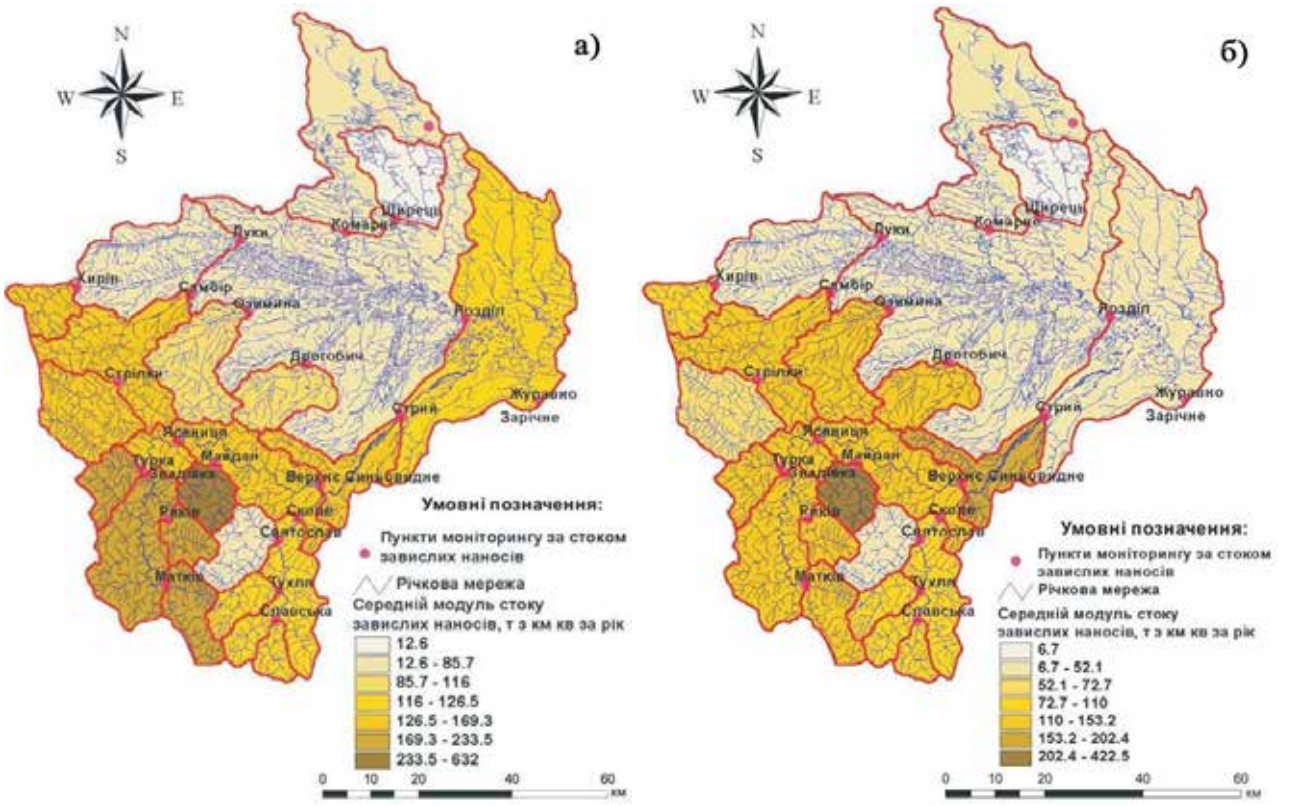


Рис. 1. Інтенсивність денудації басейнових систем верхнього Дністра за період: а) 1963–1980 рр.; б) 1980-2012 рр [6]

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття Попри значну кількість праць, присвячених русловим процесам басейну Дністра, поза увагою науковців залишається комплексний синхронний аналіз багаторічних гідрометеорологічних рядів останнього десятиліття (включаючи дані до 2025 року). Потребує уточнення вплив сучасної трансформації клімату та локального антропогенного навантаження на міжсезонний розподіл і просторову диференціацію стоку завислих наносів між правобережними та лівобережними притоками Верхнього Дністра.

Новизна Уперше проведено синхронний аналіз хронологічних рядів опадів, витрат води та стоку завислих наносів уздовж поздовжнього профілю Дністра за розширений часовий період (1947–2025 рр.). Уточнено просторово-часову специфіку перерозподілу твердого стоку між весняним та літньо-осіннім періодами за впливу сучасних кліматичних змін, а також виявлено контрастні седиментаційні режими для карпатської та подільської частин басейну.

Методологічне або загальнонаукове значення Методологічна цінність статті полягає у застосуванні підходу синхронного зіставлення гідрометеорологічних та седиментаційних параметрів для оцінки стійкості річкових геосистем. Запропонована методика дозволяє підвищити точність прогнозування ерозійно-денудаційних процесів і руслових деформацій у басейнах гірських та рівнинних річок в умовах кліматичних трансформацій.

Виклад основного матеріалу У межах цього дослідження проведено синхронний аналіз багаторічних кривих розподілу середньомісячних сум опадів, витрат води та стоку завислих наносів за період 1947–2025 рр. уздовж поздовжнього профілю Дністра (рис. 2). Узагальнені результати цього аналізу ілюструють наявність високого рівня кореляційного зв’язку між цими гідрометеорологічними показниками саме у весняний сезон (рис. 3).

Це підтверджує, що основний обсяг водного та седиментаційного стоку продукується у весняний сезон, тоді як у літній період вплив метеорологічного чинника слабшає через зниження частки інтенсивних злив. Втім, як вказано у праці [6], екстремальні зливові опади влітку 1991 року спричинили аномальні пікові значення на кривих розподілу опадів, стоку води та наносів саме в літній сезон. Проте ця залежність неодноразово порушується активним господарським освоєнням басейнової геосистеми, тому має багатофакторний характер та потребує подальшого поглибленого вивчення.

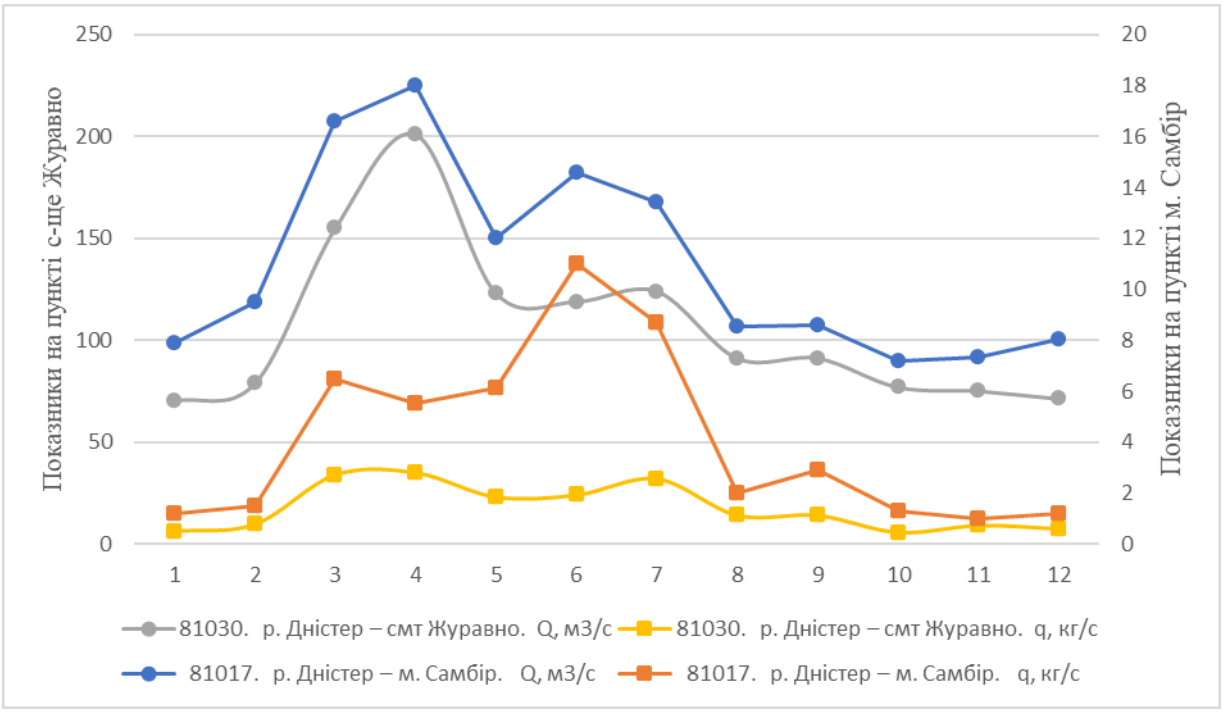


Рис. 2. Середні місячні показники витрат води (Q, м³/с) та наносів (q, кг/с) у верхній течії Дністра за багаторічний період 1947-2025рр.

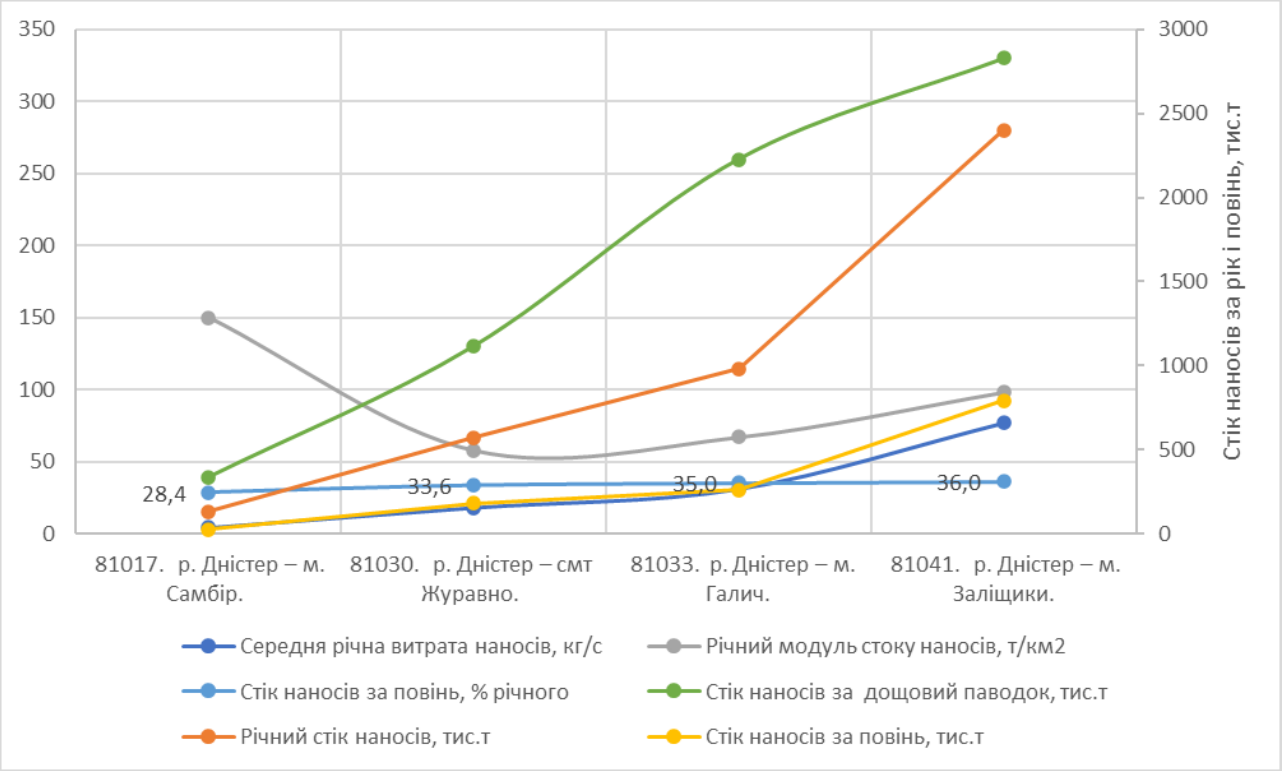


Рис. 3. Багаторічні показники стоку завислих наносів за течією річки Дністер за 1947-2025рр.

Через ландшафтно-геоморфологічну неоднорідність басейну Верхнього Дністра показники модуля стоку завислих наносів мають чітку просторово-часову диференціацію, що зумовлює принципові відмінності між осадовими режимами його Карпатських (правобережних) та Подільських (лівобережних) приток. Складні кліматичні умови, суттєва амплітуда відносних висот та панування коротких і середньої довжини схилів забезпечують високі швидкості дощового й талого стоку, що підсилюється антропогенними чинниками – насамперед інтенсивними лісорозробками у гірських геосистемах [6, 10, 11].

У межах Подільської частини басейну діють інші ерозійно-седиментаційні механізми, які також мають свою просторову неоднорідність. Для Західного Поділля властиві помірніші показники стоку наносів, що пояснюється високою лісистістю водозборів, низькою енергією рельєфу (відсутністю значних перепадів висот), затриманням й акумуляцією частини уламкового матеріалу у верхніх ланках руслової мережі, а також активним розвитком карстоутворення. Проте Східне Поділля відзначене зростанням інтенсивності ерозійних процесів через вищий рівень розораності та сільськогосподарського освоєння земель.

Головні висновки Виявлено міжсезонну перебудову структури стоку наносів: частка весняного водопілля скоротилася з 60 % до 20 % через пом'якшення зим та зменшення снігонакопичення, тоді як у літньо-осінній період зросла. Доведено наявність тісного кореляційного зв'язку між опадами, витратами води та стоку завислих наносів у весняний період уздовж усієї течії Верхнього Дністра.

Встановлено чітку просторову контрастність седиментаційних режимів: правобережні (карпатські) притоки демонструють високий ерозійний потенціал та переважання розмивів, тоді як для лівобережних (подільських) характерні помірніші показники з акумуляцією наносів на Західному Поділлі і зростанням ерозії на Східному Поділлі.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати можуть бути використані Басейновим управлінням водних ресурсів річок Західного Бугу та Сяну і Дністровським БУВР при розробці планів управління річковим басейном, проектуванні протиерозійних і протипаводкових заходів, а також під час розрахунку замулення водосховищ та оцінки якості поверхневих вод регіону.

Література

1. Пилипович О., Михнович А., Сорока О., Чікова І. Сучасні екзогенні процеси в межах Сколівських Бескидів: причини та наслідки прояву. *Проблеми геоморфології і палеогеографії Українських Карпат і прилеглих територій*. 2014. С. 140–153.
2. Кравчук Я.С. Геоморфологія Скибових Карпат. Львів: Видавн. центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2005. 232 с.
3. Екологічна ситуація на північно-східному макросхилі Українських Карпат / за ред. М. А. Голубця. Львів: Поллі, 2001. 162 с.
4. Климчук Л. Н., Блинов П. В., Величко В. Ф., Примушко С. И., Фесенко О. В., Шестопалов В. М. Сучасні інженерно-геологічні умови України як складова безпеки життєдіяльності. Київ: ВПЦ "ЕКСПРЕС", 2008. 205 с.
5. Кравчук Я. С. Геоморфологія Передкарпаття. Львів: Меркатор, 1999. 188 с.
6. Пилипович О. В., Ковальчук І. П. Геоекологія річково-басейнової системи верхнього Дністра: монографія /за наук. ред. проф. І. П. Ковальчука. Львів–Київ: ЛНУ імені Івана Франка, 2017. 284 с.
7. Hnativ R., Yakhno O., Hnativ I. Formation of the Surface Runoff of the Rivers of the Carpathian Region during the Urbanization of Slope Areas. *Journal of Ecological Engineering.* 2023. Vol. 24, No 5. P. 249–255. https://doi.org/10.12911/ 22998993/161765
8. Вишневський В. І. Про раціоналізацію спостережень за стоком річкових наносів. Наукові праці Укр. НДГМІ / під ред. В. І. Вишневського, О. В. Войцеховича. Київ: Укр. НДГМІ, 2000. Вип. 248. С. 123–137.
9. Ковальчук І. Комплексний моніторинг ерозійно-акумулятивних процесів і форм флювіального рельєфу. *Вісник Львівського університету. Серія географічна.* 2000. Вип. 27. С. 3–11.
10. Ковальчук І. П. Регіональний еколого-геоморфологічний аналіз. Львів: Ін-т українознавства, 1997. 440 с.
11. Пилипович О. Моніторингові дослідження стоку завислих наносів у басейнових системах верхньої частини сточища Дністра. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету. Серія: Географія.* 2005. № 1. С. 42–48.
12. Сусідко М., Лук'янець О. Методичні засади ймовірнісного прогнозування селевих явищ в Українських Карпатах. *Наук. праці УкрНДГМІ*. 1999. Вип. 247. С. 114–123.
13. Гребінь В.В. Внутрірічний розподіл стоку води і наносів лівобережних приток Дністра та його сучасні зміни. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія.* 2005. Т. 7. С. 133–142.
14. Ковальчук І., Михнович А. Аналіз багаторічних змін стоку річок верхньої частини басейну Дністра. *Ресурси природних вод Карпатського регіону:* Матеріали ІІ міжнародної науково-практичної конференції (Львів, 15–16 травня 2003 року). Львів: ЛвЦНТЕІ, 2003. С. 45–50.
15. Розлач З. В. Просторово-часові зміни крупності руслоформуючих відкладів на водотоках басейну Дністра (в межах України). *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія.* 2008. Т. 14. С. 108–116.
16. Hnativ I., Hnativ R., Honcharuk N. Impact of construction on erosion of slope areas in the Slavska river basin. *Scientific Journal "Theory and building practice" (JTBP).* Lviv: LPNU 2025. Vol. 7, No.2. P. 25–33. https://doi.org/ 10.23939/jtbp2025.02

Дата першого надходження статті до видання: 31.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

УДК 504.064
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.23

РОЛЬ ФАУНІСТИЧНИХ РЕСУРСІВ В ЕКОСИСТЕМАХ УКРАЇНИ

Руденко С.В.[1] (orcid.org/0009-0003-8072-2862),
Руденко В.П.[1] (orcid.org/0000-0002-7542-4399),
Руденко С.С.[2] (orcid.org/0009-0004-7248-016X),
Пахомов О.Є.[3] (orcid.org/0000-0002-5192-6140)
[1]Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича
вул. Коцюбинського, 2, 58002, м. Чернівці
[2]Донецький національний університет ім. Василя Стуса
вул.600-річчя, 21, 21021, м. Вінниця
[3]Дніпровський державний технічний університет
вул. Дніпробудівська 2, м. Кам'янське
s.rudenko@chnu.edu.ua, v.rudenko@chnu.edu.ua, rudenko.prof.eco@gmail.com, a.pakhomov@i.ua

Стверджується, що фауністичні ресурси (їх мисливські, рибні та медоносні складові) є одним з важливіших компонентів природно-ресурсного потенціалу (ПРП) екосистем України, що в свою чергу охоплює також і потенціал мінеральних, водних, земельних, лісових, природних рекреаційних ресурсів. Вартісна переоцінка ПРП екосистем України станом на 01.01.2022р. дозволяє визначити величину фауністичного потенціалу в обсязі 6,611 млрд. грн., що складає 0,474% від усього природно-ресурсного потенціалу держави. З'ясовується, що серед 360 екосистем України різного таксономічного рівня, у 42 екосистемах частка фауністичних ресурсів у компонентній структурі їх сумарного ПРП рівна або перевищує 1,0%. У ⅗ екосистем України ця частка не перевищує 1,0-1,2%, ще в ¼ екосистем фауністичні ресурси у структурі сумарного ПРП сягають відмітки в 1,3-1,5% і лише в ⅕ природних районів держави фауністичний потенціал є більшим 1,5%. Найвагомішим фауністичний потенціал у структурі ПРП екосистем є у Черняхівсько-Коростишівському (3,5%), Носівсько-Линовицькому (2,1%), Вознесенсько-Єланецькому (1,8%), Індольському (1,8%) та Білоцерківсько-Богуславському (1,7%) природних районах. Разом з цим констатується, що питома вага потенціалу фауністичних ресурсів у компонентній структурі сумарного ПРП конкретної екосистеми нерідко не відображає його значущість за його абсолютною величиною у млрд. грн. Стверджується, що лідируючі позиції за абсолютною величиною фауністичного потенціалу в Україні займають ті екосистеми, що займають більш високий таксономічний ранг. Йдеться про Лівобережно-Дніпровську провінційну екосистему (1,051 млрд. грн.), Північно-Полтавську височинну (0,383 млрд. грн.), Східно-Полтавську височинну (0,285 млрд. грн.), Північно-Східну Придніпровську височинну та Сумську схилово-височинну обласні екосистеми. Доводиться, що надзвичайно важливою при аналізі фауністичного потенціалу є оцінка його економічної продуктивності, тобто величини потенціалу у розрахунку на одного мешканця екосистеми. Для отримання співставних показників по екосистемах економічна продуктивність фауністичного потенціалу в середньому по Україні приймається за 100 балів. Найвищий рівень забезпеченості населення фауністичними ресурсами спостерігається в Чаплинсько-Чонгарському (1361 бал), Індольському (1203 бали) районах, Куяльницько-Ананьївському (682 бали), Носівсько-Линовицькому (653 бали), Кам'янсько-Дніпровсько-Енергодарському та Новобузько-Казанківському природних районах, з протилежного боку – Середньокучурганський (89 балів), Черкасько-Чигиринський (96 балів), Решитилівсько-Диканський (131 бал) райони. Відзначається, що переважна більшість екосистем України з найрозвинутішими фауністичними природно-ресурсними комплексами зосереджуються у південно-східних та південних регіонах держави, що зумовлено, насамперед, найбагатшими у цих краях медоносними та рибними ресурсами. Саме з їх збалансованим використанням, охороною та відтворенням пов'язують перспективи сталого розвитку фауністичного природокористування в екосистемах України. *Ключові слова:* фауністичний потенціал, екосистеми України, величина, продуктивність мисливських, рибних, медоносних ресурсів.

The Role of Faunistic Resources in the Ecosystems of Ukraine. Rudenko S., Rudenko V., Rudenko S., Pakhomov O.
It is argued that faunistic resources–including hunting, fishery, and melliferous (honey-producing) resources–constitute one of the most important components of the natural resource potential (NRP) of Ukraine's ecosystems. The NRP also encompasses the potential of mineral, water, land, forest, and natural recreational resources. A revaluation of the natural resource potential of Ukraine's ecosystems as of January 1, 2022, estimates the value of the faunistic potential at UAH 6.611 billion, accounting for 0.474% of the country's total natural resource potential. Among the 360 ecosystems of Ukraine representing different taxonomic levels, 42 ecosystems have a share of faunistic resources in their total NRP component structure equal to or exceeding 1.0%. In approximately three-fifths of Ukraine's ecosystems, this share does not exceed 1.0–1.2%; in another quarter of the ecosystems, faunistic resources account for 1.3–1.5% of the total NRP, while only about one-fifth of the country's natural districts possess a faunistic potential exceeding 1.5%. The highest proportion of faunistic potential within the NRP structure is observed in the Cherniakhiv–Korostyshiv Natural District (3.5%), Nosivka–Lynovytsia (2.1%), Voznesensk–Yelanets (1.8%), Indol (1.8%), and Bila Tserkva–Bohuslav (1.7%) natural districts.At the same time, it is emphasized that the share of faunistic resources within the component structure of an ecosystem's total NRP does not always reflect their actual significance in terms of absolute economic value. The ecosystems occupying higher taxonomic ranks demonstrate the largest absolute values of faunistic potential in Ukraine. These include the Left-

© Руденко С.В., Руденко В.П., Руденко С.С., Пахомов О.Є., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Bank Dnipro Provincial Ecosystem (UAH 1.051 billion), the Northern Poltava Upland Ecosystem (UAH 0.383 billion), the Eastern Poltava Upland Ecosystem (UAH 0.285 billion), as well as the Northeastern Prydnipro Upland and Sumy Slope-Upland Regional Ecosystems. The study demonstrates that assessing the economic productivity of faunistic potential–that is, the value of faunistic resources per capita–is of particular importance. To ensure comparability among ecosystems, the average economic productivity of faunistic potential in Ukraine is standardized at 100 points. The highest levels of population provision with faunistic resources are observed in the Chaplynka–Chonhar Natural District (1,361 points), Indol (1,203 points), Kuyalnyk–Ananiv (682 points), Nosivka–Lynovytsia (653 points), Kamianka-Dnipro–Enerhodar, and Novyi Buh–Kazanka natural districts. Conversely, the lowest values are recorded in the Serednii Kuchurhan (89 points), Cherkasy–Chyhyryn (96 points), and Reshetylivka–Dykanka (131 points) natural districts. It is noted that the majority of Ukraine's ecosystems with the most highly developed faunistic natural resource complexes are concentrated in the southeastern and southern regions of the country. This distribution is primarily determined by the abundance of melliferous and fishery resources in these areas. The prospects for the sustainable development of faunistic resource management in Ukraine's ecosystems are closely associated with the balanced use, conservation, and restoration of these resources. *Key words:* faunistic potential; ecosystems of Ukraine; value and productivity of hunting, fishery, and melliferous resources.

Вступ. Постановка проблеми та її актуальність. Фауністичні ресурси, що включають насамперед мисливські, рибні та медоносні ресурси є однією з важливих складових природно-ресурсного потенціалу екосистем України, який охоплює також і потенціал мінеральних, водних, земельних, лісових, природних рекреаційних ресурсів. Згідно з Законом України «Про тваринний світ» [1, стаття 1], «відносини у галузі охорони, використання і відтворення тваринного світу… регулюються Конституцією України, цим Законом, законами України «Про охорону навколишнього природного середовища», «Про мисливське господарювання та полювання» та іншими нормативно-правовими актами». У названих документах відзначається, що дикі тварини та інші об'єкти тваринного світу є природним ресурсом загальнодержавного значення та об'єктами права власності Українського народу. Безсумнівно, що місце і значення фауністичних ресурсів в екосистемах можуть бути оціненими лише в єдиній системі природно-ресурсних кадастрів через еколого-економічний (вартісний) вимір продуктивності усього природно-ресурсного комплексу України. Нами здійснена переоцінка ПРП України станом на 01.01.2022р. у розрізі її первинних природних районів, областей, провінційних екосистем, біомів – природних підзон, зон, країн [2], що дозволяє визначити ті екосистеми, у яких фауністичні ресурси відіграють помітну роль у їх розвитку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Фауністичним ресурсам, їх місцю і ролі в екосистемах різного таксономічного рівня присвячено чимало праць як окремих науковців, так і творчих колективів. Відзначимо серед них М.А. Голубця [3], у тому числі і зі співавторами [4], які в екологічному потенціалі наземних екосистем наголошують на цілісності та взаємозв'язку усіх складових ландшафту, їх стійкості до антропогенних навантажень. На важливу роль фауністичних ресурсів у геосистемах України багаторазово вказував Ф.Д. Заставний [5]. Видове різноманіття, особливості організації, розвитку, систематики, екології та збереження фауністичних ресурсів висвітлюються Л.В. Бусленко та В.В. Іванців [6]. О.М. Маренков зі співавторами [7] досліджують видовий склад, чисельність та біомасу риб, зокрема, річки Саксагань. Т.С. Шарамок та А.В. Дорошенко оцінюють сучасні біолого-екологічні характеристики такого важливого виду риб як судак [8]. Загальні особливості та види тваринного світу України узагальнюються М.В. Волченком [9]. Зарубіжні учені – М.К. Джарія зі співавторами [10], Т.С. Кіннаман [11], Л. Кртічка з колегами [12], А.Е. Мартін з колективом [13], фокусують увагу на втіленні в життя принципів Порядку денного на XXI століття, реалізації Конвенції про біологічне різноманіття. У той же час слід констатувати – зусилля дослідників у пізнанні, кількісній, зокрема, вартісній оцінці ролі, значення фауністичних ресурсів у структурі сумарного природно-ресурсного потенціалу на рівні первинних екосистем районного, обласного рівня, провінційних екосистем, біомів – підзон, природних зон та країн України є ще недостатніми. З'ясувати значення, роль фауністичних ресурсів у тих екосистемах України, де їх величина, продуктивність, принаймні, вдвічі перевищує середньодержавний рівень – **головна мета даної публікації.**

Матеріали та методи дослідження. Взявши за основу абсолютну величину фауністичного потенціалу у вартісні оцінці сумарного ПРП, визначаємо ті екосистеми від рівня природних районів, областей, провінційних екосистем, біомів – природних підзон, зон, країн України, де частка фауністичних ресурсів у компонентній структурі інтегрального потенціалу вдвічі або більше перевищує середньоукраїнський показник [2]. 6,611 млрд. грн. – величина фауністичного потенціалу відноситься до 1395,543 млрд. грн. – сумарного ПРП України як 0,474% до 100,0% [2]. Отже, виявляємо ті екосистеми, де фауністичний потенціал у структурі їх ПРП рівний або перевищує 1,0% (див. табл. 1, рис. 1).

Результати та їх обговорення. Проаналізувавши табл. 1, з'ясовуємо ті 42 екосистеми з 360 екосистем України (від рівня 278 природних районів, 57 екосистем обласного рівня, 14 провінційних екосистем, 3 підзон, 4 зон та 3-х природних країн), у яких фауністичні ресурси у компонентній структурі ПРП складають 1,0 – 3,5 відсотки. У переважній більшості екосистем України ця частка не перевищує 1,0 – 1,2% (близько ⅗ від їх загальної кількості). Ще в ¼ екосистем фауністичні ресурси сягають відмітки

в 1,3 – 1,5% і лише в ⅕ природних районів України фауністичний потенціал перевищує 1,5% в компонентній структурі їх сумарного ПРП. Варто відзначити, принаймні, п'ятірку тих екосистем України, де роль фауністичних ресурсів є вагомішою у структурі ПРП. Йдеться про Черняхівсько-Коростишівський (3,5%), Носівсько-Линовицький (2,1%), Вознесенсько-Єланецький (1,8%), Індольський (1,8%) та Білоцерківсько-Богусловський (1,7%) природні райони. Слід при цьому одразу ж зауважити, що вага потенціалу фауністичних ресурсів у компонентній структурі сумарного ПРП конкретної екосистеми нерідко не відображала його значущість за його абсолютною величиною в млрд. грн. Безперечно і логічно, лідируючі позиції за величиною фауністичного потенціалу в Україні займали екосистеми більш високого таксономічного рангу. Йдеться про Лівобережно-Дніпровську провінційну екосистему (1,051 млрд. грн.), Північно-Полтавську височинну обласну екосистему (0,383 млрд. грн.), Східно-Полтавську височинну обласну екосистему (0,285 млрд. грн.), Північно-Східну Придніпровську височинну та Сумську схилово-височинну обласні екосистеми. Надзвичайно важливою при аналізі фауністичного потенціалу є оцінка його економічної продуктивності, тобто величини потенціалу в розрахунку на одного мешканця екосистеми. Якщо економічну продуктивність фауністичного потенціалу України прийняти за 100 балів, – отримаємо рангувальний ряд рівнів забезпеченості населення екосистем ресурсами тваринного світу. Як видно з табл. 1, найвища економічна продуктивність фауністичного потенціалу характеризує такі екосистеми, як: Чаплинсько-Чонгарський район (1361 бал), Індольський район (1203 бали), Куяльницько-Ананьївський (682 бали), Носівсько-Линовицький (653 бали), Кам'янсько-Дніпровсько-Енергодарський та Новобузько-Казанківський райони. Як бачимо, названі та переважна більшість екосистем України з найрозвинутішими фауністичними природно-ресурсними комплексами зосереджуються у південно-східних та південних регіонах держави, що зумовлено, насамперед, найбагатшими в цих краях медоносними та рибними ресурсами. Саме з їх збалансованим використанням, охороною та відтворенням і повинні бути пов'язані перспективи подальшого сталого розвитку природокористування в екосистемах України.

Таблиця 1

Фауністичний потенціал екосистем в сучасному природно-ресурсному потенціалі України

Назва екосистеми	Фауністичний потенціал екосистеми		
	величина млрд. грн.	частка у ПРП екосистеми, %	економічна продуктивність, у балах
Поліська провінційна екосистема			
4. Маневицько-Володимирецький район	0,031	1,3	196
21. Іршансько-Малинський район	0,057	1,4	496
23. Черняхівсько-Коростишівський район	0,114	3,5	225
36. Коропсько-Батуринський район	0,021	1,4	439
43. Ямпільсько-Середино-Будський район	0,021	1,0	496
Західно-Українська провінційна екосистема			
60. Кременецький район	0,016	1,5	343
63. Лановецько-Теофіпольський район	0,067	1,0	261
Подільсько-Придніпровська провінційна екосистема			
73. Чуднівсько-Бердичівський район	0,041	1,0	154
XIII. Північно-Східна Придніпровська височинна обласна екосистема	0,238	1,1	261
77. Ружинсько-Сквирський район	0,057	1,0	432
78. Ставищенсько-Жашківський район	0,067	1,1	504
79. Білоцерківсько-Богуславський район	0,078	1,7	154
95. Черкасько-Чигиринський район	0,052	1,6	96
100. Куяльницько-Ананьївський район	0,041	1,6	682
Лівобережно-Дніпровська провінційна екосистема	***1,051***	***1,0***	***229***
106. Носівсько-Линовицький район	0,109	2,1	653
107. Ніжинсько-Бахмацький район	0,041	1,2	282
XXI. Північно-Полтавська височинна обласна екосистема	0,383	1,0	314
110. Конотопсько-Путивльський район	0,016	1,1	200

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

Закінчення табл. 1

Назва екосистеми	Фауністичний потенціал екосистеми		
	величина млрд. грн.	частка у ПРП екосистеми, %	економічна продуктивність, у балах
111. Дубов'язівсько-Білопільський район	0,072	1,1	250
113. Роменсько-Гадяцький район	0,072	1,0	314
114. Ромоданівсько-Миргородський район	0,114	1,1	336
XXII. Східно-Полтавська височинна обласна екосистема	0,285	1,2	271
115. Лебединсько-Зіньківський район	0,031	1,0	204
116. Решетилівсько-Диканський район	0,078	1,2	131
117. Котелевсько-Полтавський район	0,052	1,4	543
118. Краснокутсько-Карлівський район	0,124	1,3	539
XXIV. Сумська схилово-височинна обласна екосистема	0,145	1,0	186
121. Кролевецько-Глухівський район	0,047	1,1	311
124. Охтирсько-Великописарівський район	0,010	1,3	193
Дністровсько-Дніпровська провінційна екосистема			
135. Середньокучурганський район	0,005	1,0	89
137. Чичиклійсько-Бузький район	0,052	1,2	375
145. Вознесеньсько-Єланецький район	0,078	1,8	464
146. Новобузько-Казанківський район	0,047	1,2	550
Лівобережно-Дніпровсько-Приазовська провінційна екосистема			
152. Зачепилівсько-Красноградський район	0,031	1,3	446
161. Камянсько-Дніпровсько-Енергодарський район	0,031	1,0	643
Задонецько-Донська провінційна екосистема			
183. Біловодсько-Міловський район	0,036	1,0	279
Причорноморська провінційна екосистема			
196. Верхньорогачицько-Великобілозерський район	0,026	1,2	379
Причорноморсько-Приазовська провінційна екосистема			
206. Голопристансько-Дніпрянський район	0,010	1,2	210
214. Чаплинсько-Чонгарський район	0,067	1,6	1361
215. Генічесько-Сокологірненський район	0,026	1,4	593
Кримська степова провінційна екосистема			
227. Індольський район	0,067	1,8	1203
УКРАЇНА	**6,611**	**0,5**	**100**

Висновки.

1. Фауністичні ресурси (мисливські, рибні та медоносні багатства) є однією з важливих складових ПРП екосистем України, що охоплює також і потенціал мінеральних, водних, земельних, лісових, природних рекреаційних ресурсів.

2. Місце та значення фауністичних екосистем у структурі сумарного ПРП може бути визначене на підставі його вартісної переоцінки станом на 01.01.2022 р.

3. З'ясовано, що серед 360 екосистем України (від рівня 278 природних районів – до 3-х природних країн) у 42 екосистемах частка фауністичних ресурсів у компонентній структурі їх ПРП рівна або перевищує 1,0% Найвищий відсоток потенціалу фауністичних ресурсів у ПРП екосистем спостерігається у Черняхівсько-Коростишівському (3,5%), Носівсько-Линовицькому (2,1%), Вознесенсько-Єланецькому (1,8%), Індольському (1,8%) природних районах.

4. За абсолютною величиною фауністичного потенціалу у першу трійку серед екосистем України входять: Лівобережно-Дніпровська провінційна екосистема (1,051 млрд. грн.), Північно- Полтавська височинна (0,383 млрд. грн.) та Східно-Полтавська височинна (0,285 млрд. грн.) обласні екосистеми.

5. За рівнем забезпеченості населення фауністичним потенціалом серед екосистем України першими є: Чаплинсько-Чонгарський, Індольський, Куяльницько-Ананьївський, Носівсько-Линовицький, Кам'янсько-Дніпровсько-Енергодарський природні райони.

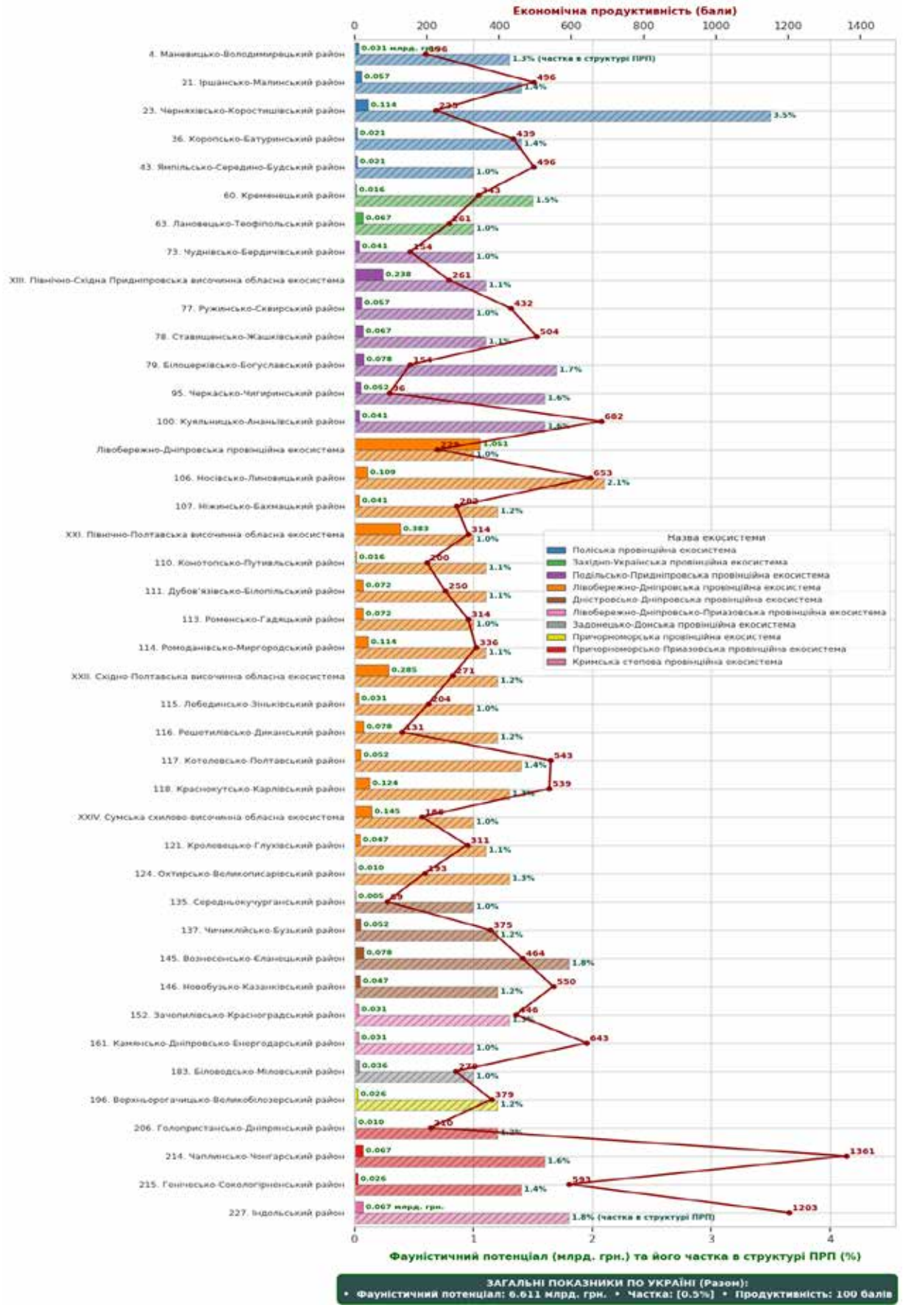


Рис. 1. Фауністичний потенціал екосистем в сумарному природно ресурсному потенціалі України

Література

1. Про тваринний світ : Закон України від 13.12.2001 № 2894-III / База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/2894-14 (дата звернення: 06.07.2026).
2. Руденко С.В., Руденко В.П. Сучасний вимір природно-ресурсного потенціалу природних країн, біомів, провінційних екосистем, природних областей та районів України. Менеджмент туристичної індустрії: освітньо-наукові домінанти : колективна монографія / Руденко В.П., Підгірна В.Н., Наконечний К.П. та ін. Чернівці : Чернівецький нац. ун-т ім. Ю. Федьковича. 2024. С. 4-21.
3. Голубець М.А. Екосистемологія. Львів: Поллі, 2000. 316 с.
4. Голубець М.А., Марискевич О.Г., Крок, Б.О., Козловський М.П., Башта А.-Т.В., Гнатів П.С., … Яворницький В.І. Екологічний потенціал наземних екосистем. Львів: Поллі, 2003. 180с.
5. Заставний Ф.Д. Україна. Природа, населення, економіка. Львів : Апріорі. 2011. 504 с.
6. Бусленко Л.В., Іванців В.В. Фауна України та її збереження: Методичні рекомендації. Луцьк, 2020. 70 с. URL: https://evnuir.vnu.edu.ua/bitstream/123456789/18456/1/fauna_ukraine.pdf
7. Маренков О.М., Боровик І.І., Нестеренко О.С., Пацький В.О., Решетняк Д.С. Видовий склад, оцінка чисельності та біомаси риб прибережних ділянок річки Саксагань в межах міста Кривий Ріг. *Екологічні науки: науково-практичний журнал.* 2025. № 6 (63). С. 85-94. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.6-63.14
8. Шарамок Т.С., Дорошенко А.В. Сучасна біолого-екологічна характеристика судака (Sander lucioperca Linnaeus, 1758) Кам'янського водосховища. *Екологічні науки: науково-практичний журнал.* 2026. № 3 (66). С. 144-149. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.19
9. Волченко М.В. Поняття, види та особливості тваринного світу. *Київський часопис права.* 2022. № 4. С. 66-70. DOI: https://doi.org/10.32782/klj/2022.4.9
10. Jhariya, M.K., Meena, R.S., & Banerjee, A. Ecological Intensification of Natural Resources for Sustainable Agriculture. *Springer Singapore.* 2021. 655 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-33-4203-3
11. Kinnaman, T.C. A New Perspective on the Natural Resource Curse. *World.* 4(4). 2023. 670. DOI: https://doi.org/10.3390/world4040042
12. Krticka, L., Tomchikov, I., & Rakytova, I. Development versus conservation: evaluation of landscape structure changes in Demanovska Valley. Slovakia. *Journal of Mountain Science.* 2018. Vol. 15. 1153 p. DOI: https://doi.org/10.1007/s11629-018-4870-0
13. Martin, A.E., Collins, S.J., Crowe, S., Girard, J., Naujokaitis-Lewis, I., Smith, A.C., … Fahrig, L. Effects of farmland heterogeneity on biodiversity are similar to – or even larger than – the effects of farming practices. *Agriculture. Ecosystems and Environment.* 2020. Vol. 288. 1-13. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106698

Дата першого надходження статті до видання: 24.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

ЕКОЛОГІЯ ЗЕМЕЛЬНИХ РЕСУРСІВ

УДК 631.46:504.5:711.4
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.24

ДЕГРАДАЦІЯ БІОТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ МІСЬКИХ ҐРУНТІВ В УМОВАХ ХРОНІЧНОГО АНТРОПОГЕННОГО ПРЕСИНГУ

Вовк М.А. (orcid.org/0009-0008-2145-0744)
Уманський національний університет
вул. Інститутська, 1, 20301, м. Умань
Vovknikolay12@gmail.com

У науковій статті здійснено комплексний аналіз, присвячений обґрунтуванню теоретико-методологічних засад та практичних аспектів застосування інноваційного біоцентричного підходу до інтегральної оцінки екологічного стану й «здоров'я» міських ґрунтів (урбоедафотопів) Центральної України, які функціонують в умовах синергетичного впливу глобальної кліматичної аридизації та хронічного багатовекторного антропогенного пресингу. Критично переосмислено традиційну парадигму моніторингу урболандшафтів та науково доведено суттєву перевагу використання живих біологічних індикаторів – зокрема обсягу мікробної біомаси, базального дихання, ензиматичної активності ключових ферментів каталази й дегідрогенази – порівняно з інертним класичним геохімічним моніторингом фізико-хімічних констант.

Окреслено головні наукові виклики на шляху розробки об'єктивних критеріїв деградації урбоедафотопів, серед яких: висока просторово-часова динамічність біотичних показників, відсутність єдиного консенсусу щодо регіональних еталонів «екологічної норми» та недостатня адаптація існуючих систем контролю до умов стрімких кліматичних змін. Крізь призму міжнародної концепції «якості ґрунтів» (*Soil Quality*) виокремлено специфіку міського середовища, де деструктивні процеси є значно глибшими й різноплановішими порівняно з аграрним сектором. Доведено, що в умовах хронічного антропогенного тиску повністю блокуються природні механізми самовідновлення та буферності урбоедафотопів, що зумовлює прогресуюче виснаження й деградацію їхнього біотичного потенціалу, зосередженого в мікробіомі та мезофауні.

На основі узагальнення офіційних даних НААН та Держгеокадастру автором укладено порівняльну матрицю масштабів деградаційних процесів ґрунтового покриву України, яка охоплює показники водно-вітрової ерозії, вторинної кислотності, засолення, а також сучасного військового техногенезу. На тлі цих глобальних викликів виокремлено специфіку міського середовища, де запечатування ядер міст сягає 80% і накладається на ефект «міського острова тепла». На основі отриманих експериментальних даних запропоновано прикладні біотехнологічні рішення для біоремедіації едафотопів задля оптимізації екологічного управління та забезпечення сталого розвитку сучасних міських агломерацій. *Ключові слова:* урбоедафотопи, біотичний потенціал, біоцентричний підхід, мікробіом ґрунту, ензиматична активність, едафічна мезофауна, екологічна стійкість, біоремедіація, антропогенний пресинг, здоров'я ґрунту.

Degradation of the Biotic Potential of Urboedaphotopes in Central Ukraine Under Chronic Anthropogenic Pressure. Vovk M.

In the scientific article, a comprehensive analysis is carried out to substantiate the theoretical and methodological foundations and practical aspects of applying an innovative biocentric approach to the integral assessment of the ecological condition and "health" of urban soils (urboedaphotopes) of Central Ukraine, functioning under the synergistic influence of global climatic aridization and chronic multivector anthropogenic pressure. The traditional paradigm of urban landscape monitoring is critically reinterpreted, and the significant advantage of using living biological indicators–particularly microbial biomass volume, basal respiration, and enzymatic activity of key enzymes such as catalase and dehydrogenase–over inert classical geochemical monitoring of physicochemical constants is scientifically proven.

The main scientific challenges in developing objective criteria for urboedaphotope degradation are outlined, including high spatiotemporal variability of biotic indicators, lack of consensus regarding regional "ecological norm" standards, and insufficient adaptation of existing control systems to the conditions of rapid climate change. Through the prism of the international "Soil Quality" concept, the specificity of the urban environment is highlighted, where destructive processes are much deeper and more diverse compared to the agricultural sector. It is proven that under chronic anthropogenic pressure, the natural mechanisms of self-recovery and buffering of urboedaphotopes are completely blocked, leading to progressive depletion and degradation of their biotic potential concentrated in the microbiome and mesofauna.

Based on the generalization of official data from NAAS and the State Geocadastre, the author compiled a comparative matrix of the scale of degradation processes in Ukraine's soil cover, encompassing indicators of water and wind erosion, secondary acidity, salinization, and modern military technogenesis. Against the backdrop of these global challenges, the specificity of the urban environment is emphasized, where city core sealing reaches 80% and overlaps with the "urban heat island" effect. Based on the obtained experimental data, applied biotechnological solutions for edaphotope bioremediation are proposed to optimize ecological management and ensure sustainable development of modern urban agglomerations. *Key words:* urboedaphotopes, biotic potential, biocentric approach, soil microbiome, enzymatic activity, edaphic mesofauna, ecological stability, bioremediation, anthropogenic pressure, soil health.

© Вовк М.А., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. Сучасний етап розвитку біосфери характеризується синергетичним впливом глобальних кліматичних змін та інтенсивного антропогенезу, що призводить до масштабної трансформації та деградації ґрунтового покриву. Кліматична аридизація, температурний стрес, нерівномірний розподіл опадів та активізація ерозійних процесів суттєво послаблюють природну стійкість екосистем. Для України, яка традиційно володіє потужним аграрно-ресурсним потенціалом, ці виклики вже набули загрозливих масштабів. За сучасними оцінками, понад половину території країни уражено водно-вітровою ерозією, значна частина земель зазнає вторинного підкислення та засолення. Додатковим деструктивним чинником останніх років став безпрецедентний військовий техногенез – механічне руйнування профілю ґрунтів важкою технікою, хімічне забруднення токсикантами внаслідок обстрілів, що супроводжується різким пригніченням функціонування ґрунтової мікробіоти та деструкцією її біомаси.

Водночас, якщо в аграрному секторі процеси деградації контролюються відносно стабільними моніторинговими інструментами, то в умовах міських ландшафтів (урбоедафотопів) ситуація є значно складнішою. На відміну від природних чи сільськогосподарських угідь, урбоедафотопи Центральної України функціонують в умовах хронічного антропогенного пресингу. Тут кліматичні аномалії накладаються на ефект «міського острова тепла», хронічне запечатування (асфальтування) територій, ущільнення та вилучення органіки (опалого листя). Як наслідок, відбувається прогресуюча деградація їхнього біотичного потенціалу – здатності саморегулюватися, підтримувати біорізноманіття та здійснювати детоксикацію забруднювачів.

У сучасному ґрунтознавстві існує очевидний методологічний розрив між теоретичним обґрунтуванням біологічних індикаторів та їхнім практичним застосуванням для оцінки стану таких трансформованих ґрунтів. Показники мікробної біомаси, базального дихання та базальної активності ключових ензимів (каталази, дегідрогенази, фосфатази) визнані у світовій практиці найбільш чутливими маркерами «здоров'я ґрунту». Проте їхня системна інтеграція у національні моніторингові програми залишається обмеженою [1].

Головним науковим викликом є висока просторово-часова динамічність біотичних показників, відсутність єдиного консенсусу щодо базових регіональних еталонів («норми») та недостатня адаптація існуючих систем контролю до умов стрімких кліматичних змін в урбоурбанізованих екосистемах. Окреслена проблема зумовлює необхідність детального дослідження біотичного потенціалу урбоедафотопів Центральної України з метою розробки об'єктивних критеріїв їхньої деградації.

Актуальність дослідження. Масштаби деградації ґрунтового покриву України та прогресуюче погіршення його фундаментальних екологічних властивостей набули критичного значення в останні десятиліття. Цей процес багато в чому синхронізувався з тривалим перехідним періодом до ринкових умов, що зумовило споживацьке, екстенсивне використання земельних ресурсів, орієнтоване на виснаження природного капіталу без належної компенсації та рекультиваційних заходів. Проте, якщо в аграрному секторі цей пресинг має переважно монофункціональний характер, то в межах міських агломерацій деструктивні процеси є значно глибшими й різноплановішими.

Сучасна концепція «якості ґрунтів» (*Soil Quality*), погоджена на міжнародному рівні (зокрема на спеціалізованих засіданнях НАТО з питань екологічно стійкого розвитку та екологічної безпеки), трактує якість як базову здатність ґрунту функціонувати в межах екосистеми, підтримувати біологічну продуктивність, забезпечувати належну якість навколишнього середовища та здоров'я живих організмів упродовж тривалого часу. В умовах міського середовища ця здатність безпосередньо залежить від екологічної стійкості урбоедафотопів, яка є інтегральною сумою їхньої функціональної біотичної продуктивності та динамічної екологічної рівноваги.

Стійкість міського ґрунту визначається його буферністю та регенераційним потенціалом – спроможністю автономно відновлювати свій структурно-функціональний стан після деструктивних збурень, викликаних комплексом зовнішніх та внутрішніх чинників. В умовах хронічного антропогенного пресингу (інтенсивне запечатування, механічне перемішування, забруднення важкими металами й нафтопродуктами, дефіцит природного опаду) механізми самовідновлення урбоедафотопів блокуються.

Головним рушієм екологічної стійкості та «здоров'я» будь-якого ґрунту є його біотичний потенціал, зосереджений у мікробіомі та мезофауні. Саме біота забезпечує замкненість геохімічних циклів та детоксикаційну функцію. Проте в урбанізованому середовищі Центральної України, де природні чорноземні ґрунти трансформуються в урбаноземи й техноземи, спостерігається хронічне виснаження та деградація цього потенціалу. З огляду на це, оцінка глибини деградації біотичного потенціалу міських ґрунтів є критично актуальною. Вона дає змогу не лише встановити поточний рівень екологічної безпеки урболандшафтів, а й визначити граничні межі їхньої стійкості, що є безальтернативною основою для розробки стратегій сталого розвитку сучасних міст [2].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. У сучасній екологічній та ґрунтознавчій літературі прискіплива увага приділяється пошуку експрес-індикаторів, здатних оперативно відображати деструктивні зміни в екосистемах. Традиційний підхід, що базу-

ється суто на моніторингу фізико-хімічних властивостей ґрунту, часто виявляється інертним, оскільки фіксує порушення на етапі глибокої, важковідновлюваної деградації. На противагу цьому, дослідження біологічних індикаторів базується на вимірюванні структурно-функціональних характеристик живих компонентів едафону, які виступають у ролі «чутливих маркерів» ранніх екологічних змін [3].

В умовах України напрям наукових пошуків останніх років змістився у бік оцінки стійкості ґрунтової мікрофлори до екстремальних антропогенних чинників. Якщо у відносно стабільний період динаміка мікробіоценозів оцінювалася переважно крізь призму агротехнічних маніпуляцій, мінерального живлення та бактеріальної інокуляції [4], то сьогодні на перший план виходять деструктивні чинники воєнного та промислового походження. Новітні дослідження, проведені у різних регіонах України, що зазнали інтенсивного військового техногенезу, фіксують катастрофічне пригнічення біотичних процесів у зонах бойових дій. Механічне руйнування архітектоніки ґрунту та токсикація продуктами вибухів призводять до деструкції мікробної біомаси та падіння ключових біотичних показників у два і більше разів порівняно з умовним контролем.

Таким чином, сучасний стан розробки проблеми засвідчує, що біологічні тест-системи реагують на екологічний пресинг значно швидше та достовірніше, ніж стандартні фізико-хімічні матриці. В умовах хронічної антропогенної нестабільності, притаманної урбоедафотопам Центральної України, саме ці параметри спроможні виступати надійною системою раннього попередження про початок незворотної деградації біотичного потенціалу міських екосистем.

Невирішені частини загальної проблеми. Попри глибоку теоретичну базу у сфері загального біомоніторингу ґрунтів, поза увагою дослідників залишається низка аспектів, пов'язаних із функціонуванням саме специфічних урбоекосистем. Досі не з'ясовано характер поєднаного впливу кліматичної аридизації та хронічного ущільнення міського субстрату на кінетику ґрунтових ферментів і міграцію трофічних груп мезофауни. Більшість існуючих робіт фокусуються на вивченні сільськогосподарських угідь, тоді як закономірності деградації біотичного потенціалу урбоедафотопів Центральної України в градієнті різних типів міського функціонального зонування (транспортна, селітебна, рекреаційна зони) залишаються фрагментарними й потребують системного теоретичного та експериментального узагальнення.

Новизна. Наукова новизна роботи полягає в детальному аналізі, як саме руйнується живе середовище урбоедафотопів у Центральній Україні під впливом антропогенного пресингу.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічне та загальнонаукове значення результатів дослідження полягає у зміні концептуальних підходів до оцінки екологічного стану міських екосистем.

Робота закладає методичну основу для розробки в майбутньому нових регіональних шкал деградації ґрунтів Центральної України. Адже визначення чутливості різних груп організмів до міського стресу дає вченим та практикам готовий методологічний інструментарій для раннього моделювання екологічного стану міст, що є безальтернативним кроком для переходу до сталого урбаністичного розвитку сучасних міст України.

Виклад основного матеріалу. Для об'єктивної оцінки ступеня деструкції біотичного потенціалу міських ґрунтів Центральної України необхідно розглядати їхнє функціонування на тлі глобальних та загальнонаціональних тенденцій ґрунтодеградації. Сучасні урбоедафотопи формуються не в ізольованому просторі; вони успадковують зональні генетичні ознаки (переважно чорноземів типових), проте зазнають специфічного хронічного пресингу [5].

Якщо в аграрному секторі деградація має чітко виражений монофункціональний характер і спрямована на виснаження поживних речовин, то в межах міських агломерацій руйнування едафону відбувається за синергетичним типом. Тут фізичне руйнування профілю та хімічний токсикоз миттєво блокують біологічні функції живих компонентів ґрунту.

Для систематизації масштабів цієї проблеми, оцінки її впливу на екосистеми та визначення стратегічних шляхів відновлення нами було розроблено узагальнюючу матрицю екологічного стану ґрунтового покриву (табл. 1).

Представлені у таблиці кількісні параметри площ ураження земельного фонду України (зокрема 57 % для еродованих, 18 % для кислих та 6 % для засолених земель) були узагальнені та запозичені автором з офіційних звітів Національної академії аграрних наук (НААН) України [6], Державної служби України з питань геодезії картографії та кадастру [7], а також матеріалів загальнодержавного екологічного моніторингу [8-9]. Ці загальнонаціональні показники використані у роботі як фундаментальне аналітичне тло для порівняння масштабів глобальної деградації з локальними змінами у штучних ландшафтах. Аналіз наведених даних крізь призму біоцентричної методології свідчить, що ключовим індикатором небезпеки є не сам факт наявності деградаційного процесу, а швидкість руйнування біотичних зв'язків, які забезпечують самоочищення ґрунту.

Наочніше уявлення про масштаби деградаційних процесів ґрунтового покриву та урбоедафотопів в Україні відображено на рисунку 1 у вигляді стовпчастих діаграм.

Головна закономірність аналізу полягає в тому, що масштабні фізико-хімічні порушення (ерозія, кислотність, засолення) виступають лише первинним тригером деструкції. Натомість остаточна втрата ґрунтом

Таблиця 1.

Основні деградаційні процеси в ґрунтах України, їхні наслідки для довкілля та заходи з поліпшення

Деградаційні процеси ґрунтів і площа ураження	Негативні наслідки для довкілля	Заходи поліпшення
Водно-вітрова ерозія *(~57 % території України)*	Руйнування родючого шару, вимивання гумусу, пилові бурі, замулення водойм. В умовах міст – оголення кореневих систем зелених насаджень.	Терасування схилів, створення захисних лісосмуг, фітомеліорація, залуження відкритих ділянок в урболандшафтах.
Вторинна кислотність *(~18 % земель)*	Погіршення рухливості поживних елементів, пригнічення азотфіксуючих бактерій, посилення міграції важких металів у підземні води.	Вапнування ґрунтів, внесення кальцієвмісних меліорантів, підбір стійких видів міських рослин-ацидофілів.
Вторинне засолення *(~6 % земель)*	Підвищення осмотичного тиску ґрунтового розчину, фізіологічна сухість для рослин, руйнування структури ґрунту, солонець.	Промивні режими, дренаж, гіпсування, мінімізація використання технічної солі під час зимового утримання міських доріг.
Хронічний антропогенний пресинг та запечатування *(локально, до 80 % в ядрах міст)*	Повне блокування газообміну та інфільтрації вологи, формування «міського острова тепла», «випадіння» чутливих груп мезофауни.	Збільшення площі відкритих газонів, використання екобруківки (перфорованого покриття), вертикальне озеленення.
Військовий техногенез та масовані обстріли *(зони бойових дій та прилеглі регіони)*	Перемішування генетичних горизонтів, хімічний шок (залишки вибухових речовин, мазут), падіння біотичних показників у 2 і більше разів.	Техногенна рекультивація, хімічна детоксикація, біоремедіація із застосуванням спеціалізованих штамів мікроорганізмів.

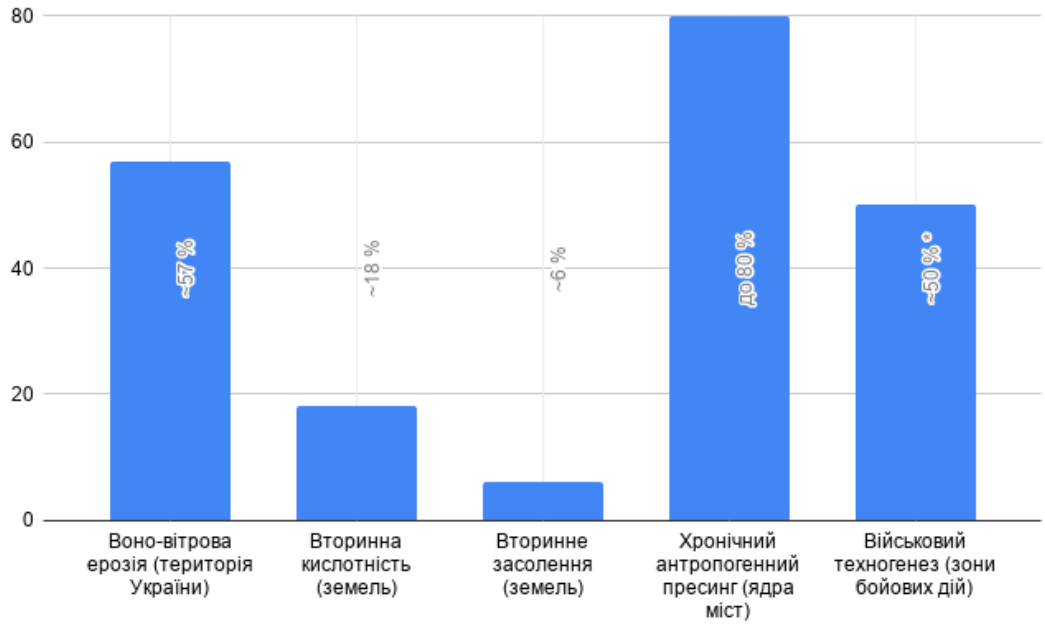


Рис. 1. Порівняльна характеристика масштабів деградаційних процесів ґрунтового покриву та урбоедафотопів в Україні за площею ураження (%)

статусу «живого тіла» та руйнування його екологічних сервісів відбуваються тоді, коли хронічний антропогенний пресинг докорінно змінює архітектоніку едафону. В урбоедафотопах Центральної України цей ефект простежується найбільш рельєфно, оскільки через постійне рекреаційне та транспортне ущільнення субстрату повністю припиняється природне надходження свіжого рослинного опаду й органіки, що запускає незворотну ланцюгову деструкцію всієї підземної екосистеми [10].

Першим етапом цього руйнування є катастрофічна трансформація макро- та мезофауни, внаслідок якої з міських субстратів майже повністю зникають найчутливіші сапрофаги-гумусоутворювачі, насамперед дощові черв'яки (*Lumbricidae*), які біологічно не здатні функціонувати в переущільненому, сухому

та позбавленому кисню ґрунті. Наступним етапом стає процес екологічного заміщення, коли вивільнені екологічні ніші заселяють дрібні, екологічно пластичні види нематод і комах. Вони володіють високою витривалістю до токсикантів, проте мають мінімальну функціональну активність і не здатні підтримувати процеси гумусоутворення. Наслідком цієї сукцесії є глибокий мікробіологічний стрес: за відсутності макро-трансформаторів органіки різко знижується мікробна біомаса, пригнічується базальне дихання та зупиняється робота найважливіших ферментів ґрунту (каталази та дегідрогенази), через що урбоедафотоп остаточно втрачає свою життєву силу й здатність до самовідновлення.

Висновки. Проведене дослідження масиву даних екологічного стану та біотичного потенціалу урбоедафотопів Центральної України дозволяє переосмислити традиційну геохімічну парадигму моніторингу та констатувати глибоку системну кризу міських ґрунтових екосистем. На тлі загальнонаціональних деградаційних викликів – водно-вітрової ерозії, вторинного підкислення й новітнього воєнного техногенезу – міське середовище формує специфічний, сукупний синергетичний стрес. Деградація біотичного потенціалу міських ґрунтів в умовах хронічного антропогенного пресингу призводить до каскадного руйнування підземного едафону, через що урбоедафотопи втрачають фундаментальні функції самоочищення та життєву силу. Збереження їхнього «здоров'я» вимагає термінового переходу від простої фіксації хімічного забруднення до біоцентричного моніторингу та відновлення живих компонентів міського субстрату.

Перспективи використання результатів дослідження. Перспективи використання отриманих результатів мають комплексний характер і охоплюють як фундаментальну науку, так і прикладні сфери міського управління. У науково-теоретичній сфері розроблений біоцентричний підхід слугує основою для створення нових регіональних екологічних шкал і матриць «здоров'я ґрунту» для міст Центральної України з урахуванням кліматичних змін. У практиці міського господарства ця система біомаркерів дає змогу комунальним службам проводити оперативне екологічне зонування територій, оптимізувати витрати на озеленення та скоригувати правила догляду за парками, зокрема впровадити заборону на повне вилучення опалого листя в рекреаційних зонах [11].

У сфері екологічного відновлення результати роботи обґрунтовують відмову від суто інженерних методів на користь біотехнологічних рішень. Вони є перспективними для розробки програм рекультивації урбаноземів шляхом штучного моделювання мікробіоценозів (внесення штамів бактерій-деструкторів, біогумусу) та впровадження екобруківки для відновлення газообміну й інфільтрації вологи. Крім того, матеріали дослідження мають високу цінність для освітнього процесу й можуть бути інтегровані у профільні курси ВНЗ з «Урбоекології», «Моніторингу навколишнього середовища» та «Ґрунтознавства».

Література

1. Мельник-Шамрай В. В., Кравчук-Ободзінська Т. В., Алпатова О. М., Сікач Т. І. Біологічні індикатори деградації ґрунтів у контексті глобальних кліматичних змін. *Аграрні інновації*. 2025. № 33. С. 187–191. URL: https://www.agrarian-innovations.izpr.ks.ua/index.php/agrarian/article/view/946 (дата звернення: 10.07.2026).
2. Деградаційні процеси в ґрунтах України та їх негативні наслідки для довкілля. *Biological Systems Theory and Innovation*. 2022. Vol. 13, No. 3-4. P. 96–109. URL: https://bioscience.com.ua/web/uploads/pdf/Biological%20Systems%20Theory%20and%20Innovation,%202022,%20Vol.%2013,%20No.%203-4-96-109.pdf (дата звернення: 12.07.2026).
3. Soil Degradation and Contamination Due to Armed Conflict in Ukraine / M. Solokha, O. Demyanyuk, L. Symochko et al. *Land*. 2024. Vol. 13, Iss. 10. Art. 1614. DOI: https://doi.org/10.3390/land13101614.
4. Даниленко А. С. *Основні напрями удосконалення земельних відносин та їх роль у формуванні стратегії національної продовольчої безпеки України у XXI столітті*. Київ : ІАЕ, 2002. 244 с.
5. Лазарєва О. В. Парадигма розвитку землеустрою в системі управління землекористуванням. *Економіка АПК*. 2006. № 10. С. 59–63.
6. Державна служба України з питань геодезії, картографії та кадастру : офіційний вебсайт. URL: https://land.gov.ua/ (дата звернення: 12.07.2026).
7. Екологічний моніторинг довкілля / Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України : офіційний вебсайт. URL: https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoryng/ekologichnyj-monitoryng-dovkillya/ (дата звернення: 12.07.2026).
8. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України (Міндовкілля) / Український кліматичний офіс : вебсайт. URL: https://ukrainian-climate-office.org/stakeholder/ministerstvo-zakhystu-dovkillia-ta-pryrodnykh-resursiv-ukrayiny-mindovkillia/ (дата звернення: 12.07.2026).
9. Національна академія аграрних наук України : офіційний вебсайт. URL: https://naas.gov.ua/ (дата звернення: 12.07.2026).
10. Русан В. М. *Економіка раціонального сільськогосподарського землекористування* : монографія. Київ : ННЦ ІАЕ, 2009. 200 с.
11. Горлачук В. В. *Управління землекористуванням* : монографія. Київ : Ліон, 2006. 376 с.

Дата першого надходження статті до видання: 16.07.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

УДК 504.53.06:550.47(477.46)
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.25

МОНІТОРИНГ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ҐРУНТІВ УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ В УМОВАХ ЗЛИВОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Гурський І.М. (orcid.org/0000-0002-3822-3889),
Імамов В.О. (orcid.org/0009-0003-3590-9003)
Уманський національний університет
вул. Інститутська, 1, 20300, м. Умань
gurskyivet@gmil.com, vyacheslav.imamov@gmail.com

Стаття присвячена комплексному аналізу латеральної міграції, перерозподілу та акумуляції екологічно небезпечних полютантів у ґрунтах міста Сміла із застосуванням катенного підходу. Обґрунтовано, що пересічений мікрорельєф міста та гідравлічна енергія поверхневого зливового стоку виступають потужними інтеграційними просторовими регуляторами, які нівелюють первинну мозаїчність техногенної емісії забруднювачів від різних джерел. На основі аналізу трьох моніторингових трансект (Центрально-транспортної, Прибережно-промислової та Магістрально-селитебної) виявлено синхронну висхідну тенденцію накопичення свинцю та цинку від елювіальних до акумулятивних позицій рельєфу. Порівняльний аналіз показав, що найбільшу амплітуду нагромадження металів демонструє Центрально-транспортна трансекта, дещо менші, але аналогічно високі показники характерні для Магістрально-селитебної території, тоді як найменш виражений пік притаманний Прибережно-промисловій зоні.

Встановлено, що максимальні концентрації токсикантів приурочені до локальних геоморфологічних понижень, які зазнають хронічного зливового підтоплення. Доведено існування вираженого ефекту «замулення» низинних зон: вміст фізичної глини (<0,01 мм) тут зростає до 44,2–46,8%, а фракція тонкого мулу (<0,002 мм) збільшується порівняно з вододілами більш ніж удвічі, досягаючи 18,1–19,5%. Така трансформація гранулометричного складу зумовлює підвищення ємності поглинання ґрунтів до 24,1–29,8 мг-екв/100 г та накопичення гумусу (3,89–4,42%). Оцінено екологічні ризики тривалого застою води, який викликає дефіцит кисню та активує відновлювальні процеси, що загрожує руйнуванням сорбційних комплексів і переходом депонованих важких металів у мобільні, високотоксичні рухомі форми. Запропонована методологічна схема дозволяє перейти від статичного точкового оцінювання забруднення до моделювання динамічних міграційних потоків речовини в міському середовищі. Отримані кількісні закономірності розширюють уявлення про механізми міського седиментогенезу й мають практичне значення для екологічного менеджменту. *Ключові слова:* урбоекосистема, урбоґрунти, катенний підхід, важкі метали, геохімічна пастка, гранулометричний склад, зливовий стік.

Monitoring the Ecological State of Urban Soils under the Impact of Stormwater Runoff. Hurskiy I., Imamov V.

The article is devoted to a comprehensive analysis of the lateral migration, redistribution, and accumulation of ecologically hazardous pollutants (heavy metals) in the soils of Smila using a landscape-geochemical (catenary) approach. It is substantiated that the dissected microrelief of the city and the hydraulic energy of surface stormwater runoff act as powerful integrative spatial regulators that smooth out the primary mosaic pattern of anthropogenic emission from various pollutant sources. Based on the analysis of three monitoring transects (Central-Transport, Coastal-Industrial, and Mainline-Residential), a synchronous upward trend in lead and zinc accumulation from eluvial to accumulative relief positions was revealed. Comparative analysis showed that the Central-Transport transect demonstrates the highest amplitude of metal accumulation, somewhat lower but similarly high values are characteristic of the Mainline-Residential area, while the least pronounced peak is inherent to the Coastal-Industrial zone.

It was established that the maximum concentrations of toxicants are confined to local geomorphological depressions experiencing chronic stormwater flooding. The existence of a pronounced “siltation” effect in low-lying zones was proven: the content of physical clay (<0.01 mm) here increases up to 44.2–46.8%, while the fine silt fraction (<0.002 mm) increases more than twofold compared to the watersheds, reaching 18.1–19.5%. This transformation of particle-size distribution leads to an increase in soil cation exchange capacity up to 24.1–29.8 meq/100 g and the accumulation of organic matter (3.89–4.42%). Ecological risks of prolonged water stagnation were assessed, which causes oxygen deficiency and activates reduction processes, threatening the destruction of sorption complexes and the transformation of deposited heavy metals into mobile, highly toxic water-soluble forms. The proposed methodological scheme allows for a transition from static point assessment of pollution to modeling dynamic migration flows of matter in the urban environment. The obtained quantitative regularities expand the understanding of urban sedimentogenesis mechanisms and possess practical significance for environmental management. *Key words:* urban ecosystem, urban soils, catenary approach, heavy metals, geochemical trap, particle-size distribution, stormwater runoff.

© Гурський І.М., Імамов В.О., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. Інтенсивний розвиток урбоекосистем, супроводжуваний розширенням транспортних мереж, ущільненням житлової забудови та техногенним тиском промислових зон, призводить до глибокої трансформації природних ландшафтів та формування специфічних урбанізованих екосистем [1]. Одним із найбільш вразливих компонентів міського середовища є ґрунтовий покрив, який виконує функцію довготривалого депонента антропогенних полютантів, зокрема важких металів. На відміну від атмосферного повітря чи поверхневих вод, де процеси самоочищення відбуваються відносно швидко, ґрунти акумулюють токсиканти протягом десятиліть, перетворюючись на джерела вторинного екологічного ризику для біоти та населення міст.

Сучасні дослідження міських екосистем дедалі частіше базуються на катенному підході, який дозволяє розглядати міську територію не як мозаїку ізольованих джерел емісії, а як цілісну динамічну систему з чітко вираженими векторами латеральної міграції речовини [2]. Умови сильнопересіченого рельєфу малих та середніх міст, як м. Сміла, демонструють високу залежність екологічного стану ґрунтів від мікроморфології поверхні. Поєднання значних ухилів, наявності балочних систем та глибоко врізаних річкових долин із високою часткою штучних водонепроникних поверхонь (асфальт, бетон) створює передумови для масштабного зливового змиву. Під час інтенсивних опадів поверхневий стік сортує та транспортує дрібнодисперсні фракції ґрунту й пилоподібних наносів із вищих геоморфологічних рівнів (елювіальних зон) через транзитні схили до локальних понижень та заплав (акумулятивних зон) [3], де формуються так звані «геохімічні пастки».

Актуальність дослідження. Актуальність дослідження зумовлена стрімким посиленням техногенного пресингу на міські екосистеми, де ґрунтовий покрив функціонує як головний довготривалий акумулятор екологічно небезпечних полютантів, зокрема важких металів. На відміну від атмосферного повітря чи водних об'єктів, ґрунти мають низький потенціал самоочищення, через що накопичені токсиканти (такі як свинець і цинк) перетворюються на приховані осередки хронічної екологічної небезпеки для біоти міст та здоров'я населення [4]. Традиційні моніторингові підходи часто нівелюють просторову неоднорідність міського середовища, розглядаючи забруднення як статичну мозаїку. Водночас в умовах пересіченого рельєфу малих і середніх міст, яскравим прикладом яких є місто Сміла з його глибоко врізаною долиною річки Тясмин та розгалуженими балочними системами, провідну роль у перерозподілі речовини починають відігравати латеральні міграційні процеси, що потребує впровадження системного катенного підходу. Таким чином, детальна просторова оцінка екологічного стану ґрунтового покриву м. Сміла за рельєфним градієнтом є критично необхідною для прогнозування зон довготривалого депонування токсикантів, розробки ефективних стратегій екологічного менеджменту та планування заходів із ремедіації урбанізованих ландшафтів.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Представлені результати дослідження є висновками із проведеної наукової роботи, що виконувалась в межах комплексних досліджень кафедри екології Уманського національного університету за темою: «Розробка методологічних підходів і практичного механізму екологічно-збалансованого природокористування», державний номер реєстрації – 0108U009772.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретико-методологічним підґрунтям для дослідження латеральної міграції речовини в геосистемах є фундаментальні концепції геохімії ландшафтів, що беруть початок від класичних праць Б. Б. Полинова та М. О. Глазовської, де катенний підхід та поняття «геохімічних пасток» визначено як базові інструменти просторового аналізу. В урбанізованому середовищі ці природні процеси зазнають глибокої техногенної трансформації. У вітчизняній науковій думці екологічний стан урбоґрунтів та трансформацію міських ландшафтів під впливом антропогенезу детально досліджували такі вчені, як О. П. Гавриленко [5] та Л.Ю. Сорокіна [7]. Водночас більшість вітчизняних публікацій фокусується на великих промислових агломераціях, тоді як специфіка просторової диференціації полютантів у межах малих і середніх міст із вираженим пересіченим рельєфом (зокрема, міст Придніпровської височини, як-от м. Сміла) все ще залишається недостатньо висвітленою.

У зарубіжній науковій спільноті ландшафтно-геохімічний аналіз урбанізованих територій розглядається як один із найбільш перспективних трендів екологічного моніторингу, що підтверджується фундаментальними роботами M. Alberti [7] та N. Grimm [8], які інтерпретують міські екосистеми як складні гібридні комплекси з інтенсивними латеральними потоками речовини. Сучасні дослідження іноземних авторів, зокрема M. Tonha [9] та S. Ramos-Romero [10], зосереджені на вивченні гранулометричного ефекту в процесах міграції токсикантів. Ними експериментально доведено, що дрібнодисперсні мулисті фракції (<0,002 мм) виступають головними носіями свинцю і цинку, концентруючись уздовж топографічного градієнта.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Недостатньо вивченими залишаються кількісні закономірності катенного перерозподілу важких металів у малих містах із сильнопересіченим рельєфом залежно від їхньої функціональної зональності. Поза увагою дослідників часто залиша-

ється ризик трансформації сорбційних комплексів в акумулятивних низинах, де тривале зливове підтоплення й дефіцит кисню можуть активувати процеси мобілізації депонованих токсикантів у рухомі, високотоксичні форми.

Новизна. Вперше на прикладі ландшафтів м. Сміла обґрунтовано роль мікроструктури рельєфу як головного просторового регулятора екологічного ризику, що нівелює мозаїчність первинної емісії полютантів. Експериментально доведено синхронність латеральної міграції Pb і Zn, яка супроводжується двократним зростанням фракції тонкого мулу та суттєвим підвищенням ємності поглинання (до 24,1–29,8 мг-екв/100 г) у нижніх ландшафтних ярусах.

Методологічне або загальнонаукове значення. Значення роботи полягає в інтеграції катенного підходу в систему моніторингу урбоекосистем, що дозволяє перейти від статичного точкового аналізу до моделювання динамічних потоків речовини. Розкриті механізми гідравлічного сортування наносів зливовим стоком розширюють теоретичні положення геохімії ландшафтів, а отримані дані слугують науковим підґрунтям для екологічного менеджменту, інженерного захисту та ремедіації міських територій.

Викладення основного матеріалу. Дослідження просторового розподілу екологічного стану ґрунтового покриву в межах урбанізованої екосистеми м. Сміла базувалося на катенному підході. Цей методологічний підхід дозволяє простежити міграцію, перерозподіл та акумуляцію екологічно небезпечних полютантів вздовж геохімічного профілю – від елювіальних ландшафтів через транселювіальні до трансакумулятивних зон, які зазнають максимального зливового навантаження.

Специфіка рельєфу м. Сміла, що характеризується пересіченістю, наявністю глибоко врізаної долини р. Тясмин, балочних систем та виражених локальних понижень, створює передумови для формування так званих «геохімічних пасток». Під час інтенсивних зливових явищ поверхневий стік з асфальтованих та бетонованих поверхонь селитебної й промислової зон акумулює значні об’єми твердих часток та розчинених сполук, які транспортуються у нижні елементи рельєфу.

Для детальної оцінки цього процесу нами було закладено три моніторингові трансекти (геохімічні катени) у різних функціональних зонах міста із чіткою географічною прив’язкою точок відбору проб за допомогою GPS-навігації (табл. 1).

Аналіз отриманих даних аналітичного контролю підтвердив гіпотезу про критичний вплив мікрорельєфу та зливового стоку на просторову диференціацію екологічного стану ґрунтів. Результати порівняльного аналізу вмісту пріоритетних токсикантів свідчать про масштабне концентрування забруднювачів у нижніх ландшафтних ярусах (рис. 1).

Таблиця 1

Географічна прив’язка та ландшафтна характеристика точок моніторингу екологічного стану ґрунтів у м. Сміла

Шифр катени	Точка відбору	Географічні координати (WGS-84)	Ландшафтно-геоморфологічна позиція	Характеристика антропогенного навантаження
Трансекта 1 (Центрально-транспортна)	Т.1-Е (елювіальна)	49°13'22.4"N, 31°52'45.1"E	Вододільне плато, вул. Незалежності	Автотранспортне навантаження помірної інтенсивності
	Т.1-ТЕ (транс-елювіальна)	49°13'35.8"N, 31°52'50.2"E	Середня частина схилу, вул. Соборна	Змив з проїжджої частини, транзитний стік
	Т.1-А (акумулятивна)	49°13'48.2"N, 31°52'58.6"E	Локальна низина біля залізничного переїзду	Зона хронічного затоплення, акумуляція зливових вод з центру
Трансекта 2 (Прибережно-промислова)	Т.2-Е (елювіальна)	49°12'10.1"N, 31°53'15.4"E	Підвищена тераса, вул. Промислова	Вплив промислових зон та приватного сектору
	Т.2-ТЕ (транс-елювіальна)	49°12'25.3"N, 31°53'30.8"E	Нижній схил корінного берега	Акумулятивно-транзитний рух поверхневих вод
	Т.2-А (акумулятивна)	49°12'38.9"N, 31°53'42.1"E	Заплавна низина р. Тясмин	Кінцева точка акумуляції талої та зливової води
Трансекта 3 (Магістрально-селитебна)	Т.3-Е (елювіальна)	49°14'05.2"N, 31°51'12.3"E	Вододіл, вул. Трипільська	Житлова забудова, приватний сектор на підвищенні
	Т.3-ТЕ (транс-елювіальна)	49°14'18.5"N, 31°51'30.0"E	Схил балки, перехрестя з інтенсивним рухом	Транзитний стік з магістралі Н-16
	Т.3-А (акумулятивна)	49°14'31.1"N, 31°51'48.4"E	Дно балочного пониження, зона накопичення наносів	Акумуляція мулу та води після злив

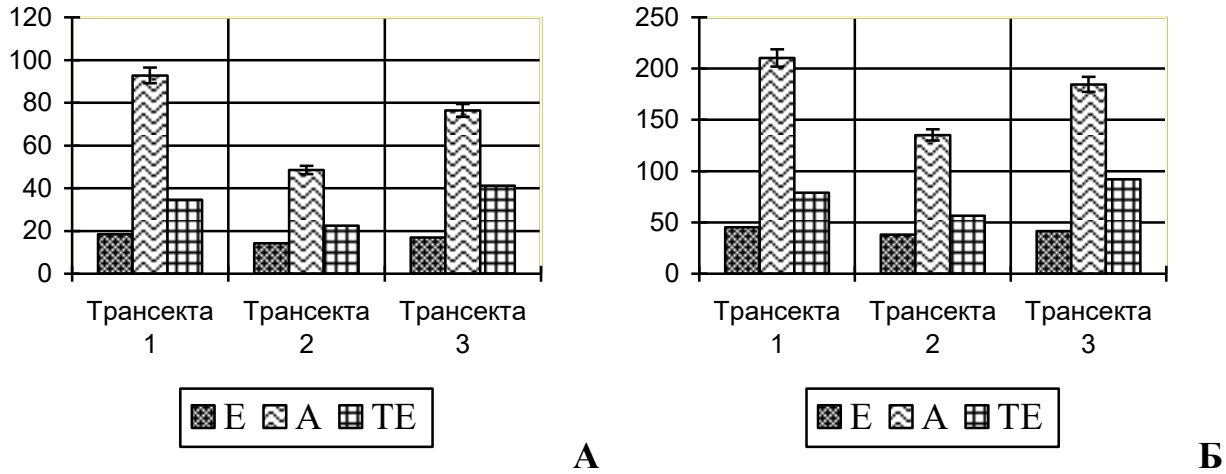


Рис. 1. Динаміка вмісту свинцю (А) та цинку (Б) в мг/кг за рельєфним градієнтом (умовні позначення: Е – елювіальна зона, А – акумулятивна зона, ТЕ – транселювіальна зона)

Аналіз отриманих графічних залежностей дозволяє виявити чітку закономірність просторового перерозподілу важких металів у системі мікроурбанізованих ландшафтів м. Сміла. Для обох досліджуваних елементів характерна ідентична за геометрією висхідна тенденція від автоморфних до акумулятивних позицій. Мінімальні значення концентрацій зафіксовані у межах вододільних плато (елювіальні фації). Це свідчить про стабільний базовий стан екотопів, які не зазнають безпосереднього гідродинамічного впливу зливових потоків.

При переході до середньої та нижньої частин схилів (транселювіальні зони) на графіках спостерігається помірне зростання кута нахилу кривих, що відгалужуються залежно від специфіки локального антропогенного навантаження. Найбільш стрімкий підйом фіксується у точках, які відповідають геохімічним депресіям рельєфу (акумулятивні зони). Цей екстремальний стрибок концентрацій наочно ілюструє роль низин як кінцевих резервуарів урбанізованого седиментогенезу. Ммаксимальні амплітуди накопичення металів демонструє Центрально-транспортна трансекта (локальне пониження біля залізничного переїзду), дещо нижчі, але аналогічно високі показники характерні для Магістрально-селитебної трансети (дно балки), а найменш виражений, хоча й висхідний пік, притаманний Прибережно-промисловій трансекті (заплава р. Тясмин).

Синхронний характер розподілу Pb та Zn на графіках доводить спільність механізмів їхнього латерального міграційного циклу в міському середовищі. Збіг точок максимального підвищення свідчить про те, що мікроструктура рельєфу та гідравлічна енергія зливового змиву виступають головними інтеграційними чинниками, які нівелюють первинну мозаїчність емісії забруднювачів від різних джерел. Графічна інтерпретація експериментальних даних беззаперечно підтверджує існування стійкого просторового вектора екологічної трансформації ґрунтів, за якого поверхневий зливовий стік перетворює локальні геоморфологічні пониження міста на зони довготривалого депонування токсикантів.

Важливим фактором, що зумовлює таку просторову диференціацію та фіксацію полютантів, є трансформація гранулометричного складу ґрунтів під впливом водної ерозії та седиментації в урбанізованому середовищі. Під час високоінтенсивних опадів відбувається гідравлічний змив дрібнодисперсних часток із вищих геоморфологічних рівнів. Водні потоки сортують тверду фазу ґрунту та пилоподібних наносів: великі піщані фракції осідають на початку схилів, тоді як найдрібніші мулисті (<0,002 мм) та глинисті (<0,01 мм) частки переносяться у зваженому стані безпосередньо в зони затоплення.

Оскільки саме мулиста фракція та тонкодисперсні колоїди володіють колосальною питомою поверхнею та високою ємністю поглинання, вони виступають основними природними сорбентами для іонів важких металів та молекул нафтопродуктів. Результати аналізу фракційного складу ґрунтів досліджуваних трансект наведено у таблиці 2.

Дані таблиці 2 чітко ілюструють ефект «замулення» акумулятивних низинних зон. Вміст фізичної глини у точках затоплення (Т.1-А, Т.3-А) зростає до 44,2–46,8%, а фракція тонкого мулу збільшується більш ніж удвічі порівняно з елювіальними плато (досягаючи 18,1–19,5%). Це свідчить про формування на дні низин вторинних техногенно-наносних горизонтів.

Така зміна гранулометричного складу кардинально змінює фізико-хімічний потенціал ґрунтів у низинах. Ємність поглинання в акумулятивних точках зростає до 24,1–29,8 мг-екв/100 г ґрунту, що суттєво перевищує показники автоморфних ділянок. З одного боку, висока сорбційна здатність та підвищений вміст органічної речовини (3,89–4,42%), яка

Таблиця 2

Гранулометричний склад та фізико-хімічні властивості ґрунтів досліджуваних трансект м. Сміла

Точка відбору проби	Вміст фракції <0,01 мм, %	Вміст фракції <0,002 мм, %	Ємність поглинання, мг-екв/100 г ґрунту	Вміст органічної речовини (гумус), %
Трансекта 1 (Центрально-транспортна)				
Т.1-Е (елювіальна)	28,4	8,2	16,5	2,81
Т.1-ТЕ (транс-елювіальна)	22,1	6,1	14,2	2,15
Т.1-А (акумулятивна)	46,8	19,5	29,8	4,42
Трансекта 2 (Прибережно-промислова)				
Т.2-Е (елювіальна)	26,2	7,9	15,8	2,65
Т.2-ТЕ (транс-елювіальна)	24,5	6,8	14,9	2,32
Т.2-А (акумулятивна)	39,4	14,2	24,1	3,89
Трансекта 3 (Магістрально-селитебна)				
Т.3-Е (елювіальна)	29,1	8,5	17,2	2,94
Т.3-ТЕ (транс-елювіальна)	21,4	5,9	13,5	1,98
Т.3-А (акумулятивна)	44,2	18,1	27,5	4,15

наноситься разом із поверхневим сміттям та листям, зв'язує токсичні елементи, переводячи їх у малорухомі форми та захищаючи на перших етапах суміжні гідросферні об'єкти.

Проте, з іншого боку, в умовах постійного зливового навантаження та тривалого застою води, в низинних ґрунтах м. Сміла створюються локальні анаеробні умови. Тимчасове перезволоження та дефіцит кисню активують процеси відновлення, що може призвести до руйнування сорбційних комплексів і трансформації міцно зв'язаних форм важких металів у мобільні, високотоксичні рухомі водорозчинні форми.

Таким чином, просторова диференціація екологічного стану ґрунтів за рельєфним градієнтом у м. Сміла підтверджує, що мікроструктура урбанізованого рельєфу виступає потужним просторовим регулятором екологічного ризику. Низинні зони міста перетворилися на стабільні осередки хронічної екологічної небезпеки через поєднання високої замуленості та екстремальних концентрацій важких металів.

Головні висновки. Застосування катенного підходу дозволило встановити, що пересічений мікрорельєф м. Сміла та гідравлічна енергія зливового стоку виступають головними регуляторами екологічного стану ґрунтів, формуючи чіткий вектор латеральної міграції та синхронного накопичення Pb і Zn від вододілів до низин. Цей процес супроводжується інтенсивним замуленням акумулятивних зон, де вміст фракції <0,002 мм зростає більш ніж удвічі (до 18,1–19,5%), що зумовлює підвищення ємності поглинання (до 24,1–29,8 мг-екв/100 г) та концентрації гумусу (до 3,89–4,42%). Попри високий первинний сорбційний потенціал таких «геохімічних пасток» (особливо у Центрально-транспортній трансекті), хронічне зливове підтоплення та дефіцит кисню активують відновлювальні процеси, які загрожують руйнуванням ґрунтових комплексів і трансформацією депонованих важких металів у мобільні, високотоксичні рухомі форми.

Перспективи використання результатів дослідження. Перспективи використання отриманих результатів полягають у їх інтеграції в систему екологічного моніторингу та містобудівного планування м. Сміла для оптимізації управління урбанізованими територіями в умовах техногенезу. Виявлені закономірності формування «геохімічних пасток» та ризики мобілізації важких металів слугуватимуть науковим підґрунтям для проектування сучасних локальних систем очищення зливового стоку, інженерного захисту низинних територій від підтоплення та диференційованого підходу до ремедіації урбоґрунтів із високим ступенем замулення.

Література

1. Cui J., Lu J., Lai Y., Wei Q., Zhao X. Spatiotemporal Dynamics and Human Health Risk Assessment of Potentially Toxic Elements in Global Urban Soils: A Systematic Meta-Analysis. *Toxics*, 2026. 14(6). P. 496.
1. https://doi.org/10.3390/toxics14060496
2. Chuanghong Su, Hongcheng Li, Shaoyang Chen, Yushu Shu, Zheyong Li, Qiang Zhang, Yong Yang, Luojing Xiang. Source-oriented landscape apportionment of heavy metals by using an integrated approach in typical mining urban agricultural soil. *Environmental Pollution*, 2025. 382. P. 126719.
3. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126719

4. Bilodeau E., Martel J., Arsenault R., Brissette F. «Evaluation of the Impact of Rainfall Increases on Runoff in Urban Watersheds.» *Journal of Water Management Modeling,* 2025. 33. P. 559. https://doi.org/10.14796/JWMM.C559
5. Zandybay A., Kydyrova A., Karilkhan A., Gulnur S., Daribay A., Mkilima T. Potential impact of urbanization on heavy metals accumulation in surface soils of rapidly urbanizing cities. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 2025. 11(4). P. 1547–1566. https://doi.org/10.22034/gjesm.2025.04.11
6. Гавриленко О.П. Шляхи раціоналізації регіонального природокористування в Україні: геоекологічний підхід. *Вісник Київського нац. ун-ту імені Тараса Шевченка. Серія: Географія*, 2011. Вип. 58. С. 20-22.
7. Сорокіна Л.Ю. Антропогенізовані ландшафти України – традиційні та поствоєнні: класифікаційні рівні, проблеми відновлення. *Ланшафтознавство*, 2022. № 2(2). С. 18–35. https://doi.org/10.31652/2786-5665-2022-2-18-35
8. Alberti M. *Advances in Urban Ecology: Integrating Humans and Ecological Processes in Urban Ecosystems*. Springer, 2008. ISBN 9780387755106.
9. Grimm N.B., Grove J.M., Pickett S.T.A., Redman C.L. Integrated Approaches to Long-Term Studies of Urban Ecological Systems. *BioScience*, 2000. Vol. 50(7). P. 571–584.
10. Tonhá M.S., Garnier J., Araújo D.F., Cunha B.C.A., Machado W. Trace metal dynamics in an industrialized Brazilian river: A combined application of Zn isotopes, geochemical partitioning, and multivariate statistics. J*ournal of Environmental Sciences*, 2021. Vol. 101. P. 313–325.
11. Ramos-Romero S.S., Benavides-Rosales H.R., Peña-Chamorro J.J. Advances in modelling the transport of heavy metals in agricultural soils and their leaching into groundwater: an integrative critical review. *Front. Environ. Sci.*, 2026. 14:1764394. https://doi.org/10.3389/fenvs.2026.1764394

Дата першого надходження статті до видання: 16.07.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

УДК 504.05:631.4:631.95:546.3/.9:581.1
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.26

ОЦІНКА ТЕХНОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ АГРОЕКОСИСТЕМ ВАЖКИМИ МЕТАЛАМИ

Кучеренко В.А. (orcid.org/0009-0004-2371-8135)
Уманський національний університет
вул. Інститутська, 1, 20300, Умань
farro.vladimir.kucherenko@gmail.com

У статті висвітлено результати комплексного екологічного оцінювання та детального моніторингу просторового розподілу рухомих форм свинцю, кадмію та цинку в орному шарі чорноземів типових Правобережного Лісостепу України під впливом техногенного навантаження транспортної інфраструктури Вінницької області. Науково обґрунтовано вибір локацій дослідження, безпосередньо прилеглих до автомагістралей з високою інтенсивністю руху, що дозволило простежити закономірності міграції пріоритетних токсикантів у системі «транспортна магістраль – ґрунт – рослина». Експериментально доведено, що найбільший рівень акумуляції важких металів формується в –імпактній зоні на відстані 10 метрів від полотна дороги, де концентрація рухомого цинку перевищує гранично допустиму норму і досягає 24,50 мг/кг, а вміст свинцю та кадмію наближається до критичної межі, становлячи 4,82 мг/кг та 0,61 мг/кг відповідно. У міру віддалення від джерела емісії вглиб агроценозу зафіксовано стрімке згасання техногенного тиску: вже на відстані 50 метрів вміст елементів знижується суттєво нижче ГДК, а на відстані 500 метрів стабілізується на рівні природного геохімічного фону території, що дає змогу чітко детермінувати межі придорожньої буферної зони.

Важливою складовою роботи є дослідження транслокаційного потенціалу важких металів у системі «ґрунт – рослина» на прикладі стратегічної продовольчої культури – пшениці озимої. Виявлено виражену вибірковість накопичення та поорганного розподілу токсикантів у вегетативних і генеративних органах рослин. На основі розрахункових коефіцієнтів накопичення та переходу експериментально підтверджено ефективне функціонування природних фізіологічних бар'єрних систем озимої пшениці, які лімітують надходження ультратоксикантів до репродуктивних органів, депонуючи основну масу абсорбованих свинцю, кадмію та цинку в соломі. Встановлено, що найбільшу рухливість демонструє кадмій, тоді як свинець характеризується мінімальним коефіцієнтом переходу в зерно, що свідчить про надійну роботу кореневих та стеблових бар'єрів пшениці за умов поліметалевого навантаження. *Ключові слова:* важкі метали, свинець, кадмій, цинк, чорноземи типові, пшениця озима, транслокація, бар'єрний ефект, агроекосистема.

Assessment of Technogenic Pollution of Agroecosystems by Heavy Metals. Kucherenko V.

The article presents the results of a comprehensive ecological assessment and detailed monitoring of the spatial distribution of mobile forms of lead, cadmium, and zinc in the arable layer of typical chernozems in the Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine under the impact of technogenic load from the transport infrastructure of Vinnytsia region. The selection of research locations directly adjacent to highways with high traffic intensity is scientifically substantiated, which allowed tracing the migration patterns of priority toxic elements in the "highway – soil – plant" system. It was experimentally proven that the highest level of heavy metal accumulation is formed in the impact zone at a distance of 10 meters from the road edge, where the concentration of mobile zinc exceeds the maximum permissible level and reaches 24.50 mg/kg, while the content of lead and cadmium approaches the critical limit, amounting to 4.82 mg/kg and 0.61 mg/kg, respectively. With distance from the emission source deeper into the agrocoenosis, a rapid decline in technogenic pressure was recorded: already at a distance of 50 meters, the content of elements decreases significantly below the maximum permissible concentration, and at a distance of 500 meters, it stabilizes at the level of the natural geochemical background of the territory, which makes it possible to clearly determine the boundaries of the roadside buffer zone.

An important component of the research is the study of the translocation potential of heavy metals in the "soil – plant" system using winter wheat as a strategic food crop. A pronounced selectivity of accumulation and organ-specific distribution of toxicants in vegetative and generative organs of plants was revealed. Based on the calculated accumulation and transfer factors, the effective functioning of natural physiological barrier systems of winter wheat was experimentally confirmed. These barriers limit the transport of toxicants to reproductive organs, depositing the bulk of absorbed lead, cadmium, and zinc in the straw. It was established that cadmium exhibits the highest mobility, while lead is characterized by a minimal transfer factor to the grain, indicating the reliable performance of root and stem barriers of wheat under conditions of polymetallic load. *Key words*: heavy metals, lead, cadmium, zinc, typical chernozems, winter wheat, translocation, barrier effect, agroecosystem.

Постановка проблеми. Збереження екологічної стабільності чорноземів Правобережного Лісостепу України в умовах техногенезу є ключовою передумовою сталого розвитку аграрного сектору та гарантування продовольчої безпеки [1]. На сучасному етапі інтенсивний розвиток транспортної інфраструктури та хімізація землеробства зумовлюють надходження в агроекосистеми широкого спектра токсикантів, серед яких за ступенем небезпеки та персистентності провідне місце посідають важкі метали [2].

© Кучеренко В.А., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Особливо гостро ця проблема проявляється у придорожніх зонах автомагістралей, які виступають потужними лінійними джерелами постійної емісії свинцю, кадмію та цинку в орні горизонти прилеглих полів [3].

Зазначені елементи характеризуються високою мобільністю в системі «ґрунт – рослина» та здатністю накопичуватися в біомасі сільськогосподарських культур, порушуючи фізіологічні процеси та знижуючи якість сировини [4]. Водночас реакція стратегічних продовольчих культур, зокрема пшениці озимої, на локальне поліметалеве забруднення чорноземів типових в умовах Правобережного Лісостепу залишається з'ясованою не до кінця. Існує об'єктивна наукова потреба у точнішій деталізації просторових меж імпактного впливу автотранспорту та визначенні кількісних параметрів транслокації металів у генеративні органи рослин для обґрунтування екологічно безпечних режимів землекористування.

Актуальність дослідження. Необхідність гарантування продовольчої безпеки та збереження екологічної стійкості земельних ресурсів України в умовах інтенсивного техногенезу зумовлює високу актуальність моніторингу агроекосистем Правобережного Лісостепу. Цей регіон, що володіє значним природно-ресурсним потенціалом чорноземів типових, піддається постійному антропогенному впливу через розвинену транспортну інфраструктуру, зокрема на території Вінницької області. Поєднання інтенсивного землеробства та хронічної аерогенної емісії важких металів від автотранспорту створює передумови для накопичення свинцю, кадмію та цинку у верхніх горизонтах ґрунту, що загрожує стійкості біогеохімічних процесів та біологічній чистоті вирощуваної продукції.

Значущість вирішення цієї проблеми полягає у необхідності детального вивчення механізмів транслокації пріоритетних токсикантів у системі «ґрунт – рослина» на прикладі пшениці озимої як головної продовольчої культури. Встановлення бар'єрних функцій вегетативних та генеративних органів рослин за різних рівнів поліметалевого навантаження дозволяє оцінити реальні ризики надходження екотоксикантів до трофічних ланцюгів і виявити фізіологічні особливості сортів щодо затримання шкідливих елементів.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Представлені у роботі матеріали є складником науково-дослідної роботи, що виконується на кафедрі екології Уманського національного університету в межах комплексної теми «Розробка методологічних підходів і практичного механізму екологічно-збалансованого природокористування» (державний реєстраційний номер 0108U009772).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема техногенного забруднення агроекосистем і транслокації важких металів у системі «ґрунт – рослина» перебуває в центрі уваги багатьох іноземних дослідників, які акцентують увагу на довготривалих екологічних ризиках для глобальної продовольчої безпеки. Наукові праці підтверджують, що інтенсивний розвиток дорожньо-транспортних мереж є домінуючим чинником локального поліметалевого забруднення сільськогосподарських угідь, оскільки процеси зносу гальмівних колодок, шин та згоряння палива призводять до постійної емісії токсикантів [5]. Результати досліджень придорожніх екосистем у різних країнах світу доводять, що концентрація таких елементів, як свинець, кадмій та цинк, сягає свого максимуму у вузькій придорожній смузі завширшки до десяти метрів від полотна дороги, після чого стрімко знижується з віддаленням углиб полів [6–8]. Це узгоджується із концепцією формування локальних буферних зон і підтверджує необхідність встановлення чітких просторових меж для безпечного ведення рослинництва.

Особливе місце в сучасній іноземній літературі присвячено вивченню бар'єрних механізмів культурних рослин, зокрема пшениці озимої, щодо акумуляції важких металів. Дослідники зазначають, що здатність рослин транспортувати іони металів з кореневої системи до надземних органів залежить як від біологічних особливостей генотипу, так і від рухомості хімічних сполук у грунтовому розчині [9, 10]. Встановлено, що кадмій характеризується значно вищим коефіцієнтом біоакумуляції та транслокації порівняно зі свинцем, що робить його одним із найнебезпечніших токсикантів для продовольчих ланцюгів через його здатність проникати безпосередньо в генеративні органи рослин [11].

Попри значний масив накопичених даних, іноземні автори наголошують на необхідності проведення регіональних досліджень, оскільки рухомість і доступність важких металів для рослин безпосередньо регулюються фізико-хімічними властивостями конкретних типів ґрунтів.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Попри значну кількість фундаментальних праць, присвячених поведінці екотоксикантів у навколишньому середовищі, поза увагою дослідників часто залишаються питання комплексної оцінки поліметалевого навантаження на чорноземи типові в умовах реальних локальних зон придорожніх агроценозів Правобережного Лісостепу України. Існує об'єктивний дефіцит емпіричних даних щодо одночасної міграції та взаємодії трьох найбільш поширених токсикантів – свинцю, кадмію та цинку – в системі «автотранспортний простір – ґрунт – вегетативні та генеративні органи озимої пшениці». Недостатньо вивченим залишається кількісне вираження бар'єрних функцій сучасних сортів зернових культур та просторове диференціювання коефіцієнтів переходу цих металів у критичній близькості до лінійних джерел емісії, що обмежує

можливості точного прогнозування якості рослинницької сировини в регіоні.

Новизна. Наукова новизна отриманих результатів полягає у встановленні просторових закономірностей розподілу та параметрів поорганої транслокації рухомих сполук свинцю, кадмію та цинку в агроекосистемах Правобережного Лісостепу на різній відстані від автомагістралі з високою інтенсивністю руху. Уперше для умов чорноземів типових Вінницької області кількісно охарактеризовано екологічну ємність системи та захисний потенціал пшениці озимої через призму розрахункових коефіцієнтів накопичення та переходу. Отримано нові дані щодо меж інтенсивного накопичення важких металів у соломі та зерні, що дозволило чітко детермінувати просторовий діапазон імпактного впливу транспорту та довести селективну вибірковість фізіологічних бар'єрів рослин щодо акумуляції кадмію та свинцю в генеративній зоні.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічне та загальнонаукове значення проведеного дослідження полягає у вдосконаленні науково-методичних підходів до оцінювання екологічної безпеки придорожніх агроекосистем на основі інтегрованого аналізу ґрунтово-рослинного покриву. Розроблені концептуальні засади просторового моніторингу екотоксикантів дозволяють точніше оцінювати стійкість біогеоценозів до техногенного пресу та розраховувати екологічні ризики для трофічних ланцюгів. Загальнонауковий внесок роботи полягає в поглибленні теоретичних уявлень про механізми біогеохімічної міграції хімічних елементів у штучно змінених ландшафтах, що слугуватиме фундаментальною базою для оптимізації придорожнього землекористування та розробки екологічно безпечних технологій вирощування стратегічних продовольчих культур.

Викладення основного матеріалу. Екологічний стан агроекосистем Правобережного Лісостепу України на сучасному етапі визначається складним поєднанням високого природно-ресурсного потенціалу чорноземних ґрунтів та зростаючого антропогенного тиску. Вибір локацій для проведення досліджень обумовлений необхідністю комплексної оцінки впливу основних джерел техногенезу, характерних для даного регіону. Вінницька область характеризується густою мережею автомобільних доріг міжнародного та національного значення, які виступають потужними лінійними джерелами емісії токсикантів, а також інтенсивним веденням сільського господарства із систематичним застосуванням мінеральних добрив і засобів захисту рослин.

Для детального моніторингу просторового розподілу важких металів було обрано модельні агроекосистеми, безпосередньо прилеглі до автомагістралі з високою інтенсивністю руху транспорту. Такий підхід дозволив простежити міграційні процеси в системі «джерело викидів – грунт – рослина» на різній відстані від епіцентру техногенного впливу. Пріоритетними екотоксикантами для контролю було визначено свинець, кадмій та цинк, оскільки саме ці метали мають найвищий ступінь небезпеки, характеризуються тривалим періодом напіввиведення з ґрунтового профілю та здатні активно залучатися до трофічних ланцюгів. Дослідження геохімічної структури ґрунтового покриву на різному віддаленні від полотна автодороги дало змогу встановити реальні масштаби та межі зони аерогенного забруднення.

Аналіз отриманих експериментальних даних щодо просторового розподілу рухомих форм важких металів в орному шарі чорноземів типових засвідчив чітко виражений гетерогенний характер накопичення елементів, що безпосередньо залежить від відстані до транспортної артерії. Було зафіксовано закономірне зниження концентрацій усіх трьох досліджуваних металів у міру віддалення від полотна автодороги вглиб агроценозу. Найбільш критична екологічна ситуація спостерігається у безпосередній близькості до автошляху, де процеси акумуляції токсикантів відбуваються найінтенсивніше, що підтверджується конкретними кількісними показниками аналізу ґрунтових зразків (рис. 1).

Аналіз експериментальних даних, наведених у рис. 1, свідчить про наявність чітко вираженого локального забруднення чорноземів типових рухомими сполуками важких металів у зоні безпосереднього впливу автомагістралі. При зіставленні отриманих концентрацій із законодавчо встановленими гранично допустимими концентраціями (ГДК) виявлено, що у придорожній смузі на відстані 10 метрів від полотна автодороги спостерігається перевищення нормативу за вмістом цинку, який досяг 24,50 мг/кг при величині ГДК 23,00 мг/кг. Концентрації свинцю та кадмію у цій же зоні наближаються до критичної межі, становлячи 4,82 мг/кг (80,3% від ГДК) та 0,61 мг/кг (87,1% від ГДК) відповідно. Така ситуація вказує на високий рівень екологічного ризику для сільськогосподарських угідь, розташованих у безпосередній близькості до транспортної інфраструктури, де поєднуються процеси постійної аерогенної емісії токсикантів та їх тривалої акумуляції у верхньому гумусовому горизонті.

У міру віддалення від транспортної артерії інтенсивність техногенного тиску стрімко згасає, що простежується через послідовне зниження рівнів накопичення всіх досліджуваних елементів у ґрунтовому профілі. Вже на відстані 50 метрів від джерела емісії концентрації свинцю, кадмію та цинку опускаються суттєво нижче межі допустимого стандарту і становлять відповідно 52,5%, 60,0% та 79,1% від величини ГДК. На віддалі 500 метрів, яка прийнята за контрольну зону, вміст рухомих форм металів стабілізується на мінімальних значеннях і є в кілька разів нижчим за граничні нормативи, фіксуючи природний геохімічний фон території Правобережного

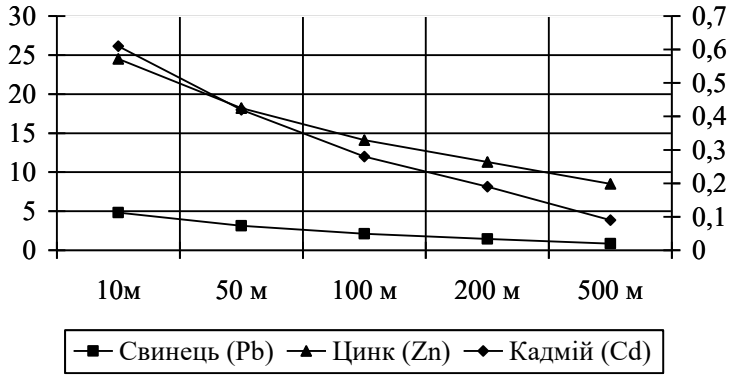


Рис. 1. Вміст рухомих форм важких металів у ґрунті залежно від віддалі до джерела техногенного навантаження, мг/кг абсолютно сухого ґрунту

Лісостепу. Отримана закономірність просторового розподілу підтверджує, що зона інтенсивного транскордонного забруднення ґрунтового покриву вздовж автошляхів є відносно локальною і зосереджена переважно в межах 50-метрового буферного поясу.

Дослідження транслокаційного потенціалу важких металів у системі «ґрунт – рослина» на прикладі культури пшениці озимої виявило виражену вибірковість накопичення елементів різними органами рослин. Вегетативна маса (солома) виступає потужнішим бар'єром на шляху міграції токсикантів порівняно з генеративними органами (зерном) (табл. 1).

Аналіз експериментальних даних щодо накопичення екотоксикантів в органах пшениці озимої дозволяє виявити чітку закономірність розподілу важких металів між вегетативними та генеративними органами рослин. Результати досліджень підтверджують функціонування природних фізіологічних бар'єрів озимої пшениці, спрямованих на захист репродуктивних органів від надмірного надходження токсичних елементів. У всіх досліджуваних варіантах, незалежно від ступеня техногенного навантаження та відстані до джерела емісії, концентрація свинцю, кадмію та цинку в соломі суттєво перевищувала їхній вміст у зерні. Це свідчить про те, що саме вегетативна маса бере на себе основну роль депонуючого середовища, затримуючи значну частину рухомих сполук металів на шляху їхнього висхідного току від кореневої системи до колосу.

Детальний аналіз демонструє, що інтенсивність транслокації елементів має виражену специфіку залежно від хімічної природи металу та зони вирощування. Так, у найбільш забрудненій імпактній зоні (10 м від магістралі) вміст свинцю в соломі становив 1,22 мг/кг, тоді як у зерні його концентрація була у 3,5 рази меншою і досягала 0,35 мг/кг. Подібний бар'єрний ефект виявлено і для кадмію: за максимального тиску його концентрація зменшувалася з 0,18 мг/кг у соломі до 0,08 мг/кг у зерні. Цинк, будучи життєво необхідним мікроелементом, транспортувався до генеративних органів активніше, проте й для нього зафіксовано утримання у соломі на рівні 28,10 мг/кг проти 15,40 мг/кг у зерні.

Оцінка отриманих результатів у контексті гігієнічної безпеки та порівняння з гранично допустимими концентраціями свідчить про задовільний стан вирощеної продукції за більшістю показників. Навіть в імпактній зоні вміст кадмію (0,08 мг/кг) та цинку (15,40 мг/кг) у зерні не перевищував чин-

Таблиця 1

Концентрація важких металів в органах пшениці озимої за різного рівня забруднення грунту, мг/кг сухої речовини

Елемент	Зона відбору (відстань)	Вміст у соломі	Вміст у зерні
Свинець (Pb)	Імпактна (10 м)	1,22	0,35
	Буферна (100 м)	0,64	0,18
	Фонова (500 м)	0,21	0,05
Кадмій (Cd)	Імпактна (10 м)	0,18	0,08
	Буферна (100 м)	0,09	0,04
	Фонова (500 м)	0,03	0,01
Цинк (Zn)	Імпактна (10 м)	28,10	15,40
	Буферна (100 м)	19,30	11,20
	Фонова (500 м)	12,40	8,60

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

них нормативів безпеки рослинницької сировини, які становлять 0,10 мг/кг та 50,00 мг/кг відповідно. Певне занепокоєння викликає лише концентрація свинцю у зерні на відстані 10 метрів від полотна дороги (0,35 мг/кг), яка наближається до критичного порогу безпеки. Проте вже в межах буферної зони (100 м) і на контролі (500 м) спостерігається стрімке падіння вмісту всіх елементів у зерні до абсолютно безпечних рівнів, що підтверджує можливість отримання екологічно безпечної продукції рослинництва за умов дотримання просторової ізоляції посівів від лінійних джерел забруднення.

Головні висновки. Проведені комплексні дослідження просторового розподілу та особливостей транслокації пріоритетних важких металів в агроекосистемах Вінницької області дозволяють констатувати наявність вираженого локального техногенного впливу транспортної інфраструктури на стан ґрунтового та рослинного покриву. На основі аналізу геохімічного профілю орного шару чорноземів типових доведено існування чіткої зони імпактного навантаження, яка локалізована в межах 50-метрової смуги від автодороги. Саме в цьому радіусі фіксуються максимальні концентрації рухомих форм токсикантів, що за вмістом цинку перевищує гранично допустимі ліміти, а за показниками свинцю та кадмію наближається до критичної межі. На віддалі понад 50 метрів техногенний тиск різко згасає, а на відстані 500 метрів повністю нівелюється, стабілізуючись на рівні природного фону, що вказує на локальний характер транскордонної аерогенної емісії та високу детоксикаційну здатність чорноземних ґрунтів регіону.

Експериментально встановлені параметри накопичення металів у біомасі пшениці озимої підтверджують високу ефективність фізіологічних захисних систем культури на шляху міграції забруднювачів до репродуктивних органів. Показники розподілу свідчать, що вегетативна маса виступає основним бар'єрним та акумулюючим середовищем, затримуючи переважну частину абсорбованих сполук свинцю, кадмію та цинку, завдяки чому їхня концентрація в генеративних органах знижується у кілька разів. Хоча в імпактній зоні вміст свинцю в зерні наближається до гранично допустимих нормативів харчової безпеки, загальна екологічна якість вирощеної продукції залишається задовільною. Це дозволяє стверджувати, що за умов дотримання регламентованої просторової ізоляції агроценозів від джерел викидів стає можливим стабільне виробництво екологічно безпечної та гігієнічно повноцінної продукції рослинництва.

Перспективи використання результатів дослідження. Практична значущість та наукові перспективи використання отриманих результатів лежать у площині розробки та впровадження систем високоточного екологічного моніторингу та раціонального природокористування в зоні техногенного тиску. Накопичений експериментальний матеріал слугуватиме надійною основою для проведення просторового екологічного зонування сільськогосподарських угідь, що дозволить диференціювати технології вирощування культур залежно від їхнього віддалення від транспортних магістралей. Зокрема, встановлені межі 50-метрової буферної зони вказують на необхідність оптимізації структури посівних площ у придорожніх смугах шляхом виключення з сівозмін продовольчих культур і переходу на вирощування технічних рослин або біоенергетичної сировини.

Література

1. Фурдичко О.І., Дребот О.І., Дем'янюк О.С. та ін. *Наукові основи формування збалансованих агроекосистем України в умовах змін клімату: монографія* / за науковою редакцією академіка НААН О.І. Фурдичка. Київ: ДІА, 2021. 320 с.
2. Khan MM, Qiu B, Zhu Z. Heavy Metals in Agriculture: Sources, Industrial Applications, Plant Toxicity, and Remediation Approaches. *International Journal of Molecular Sciences*, 2026. 27(14):6192. https://doi.org/10.3390/ijms27146192
3. De Silva S., Ball A.S., Indrapala D.V., Reichman S.M. Review of the interactions between vehicular emitted potentially toxic elements, roadside soils, and associated biota. *Chemosphere*, 2021. 263:128135. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128135.
4. Ali Hazrat, Khan Ezzat, Ilahi Ikram. Environmental Chemistry and Ecotoxicology of Hazardous Heavy Metals: Environmental Persistence, Toxicity, and Bioaccumulation, *Journal of Chemistry*, 2019. 6730305. https://doi.org/10.1155/2019/6730305.
5. Peng X., Zhang Y., Li J. Heavy metals in roadside soil along an expressway connecting two megacities in China: Accumulation characteristics, sources and influencing factors. *Science of The Total Environment*, 2024. Vol. 955. 177095. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177095.
6. Binner H., Sullivan T., Jansen M.A.K., McNamara M.E. Metals in urban soils of Europe: A systematic review. *Science of The Total Environment*, 2023. Volume 854. 158734. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158734.
7. Fotini Botsou, Ali Sungur, Efstratios Kelepertzis, Mustafa Soylak. Insights into the chemical partitioning of trace metals in roadside and off-road agricultural soils along two major highways in Attica's region, Greece. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2016. Volume 132. P. 101-110. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.05.032.
8. Zhang X.N., Guo Q.P., Shen X.X., Yu S.W., Qiu G.Y. Water Quality, Agriculture and Food Safety in China: Current Situation, Trends, Interdependencies, and Management. *J. Integr. Agric*, 2015. 14. P. 2365–2379.
9. Fuyong Liu, Chuang Ma, Martina Fattobene, Elisa Santoni, Raffaele Emanuele Russo, Silvia Zamponi, Paolo Conti, Hongzhong Zhang, Mario Berrettoni. Comparative analysis of wheat heavy metal accumulation across multiple regions and the influence of cultivation practices. *Ecotoxicology and Environmental Safety,* 2025, Volume 303. 118875. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118875.

10. Guo Jiahong, Chen Yiping, Zhao Yan, Tian Hanwen, Jiang Yao, Zhang Yuchen. Molecular mechanisms of wheat acclimation to soil degradation: Insights into salt stress, heavy metal contamination, and nutrient deficiency. *Environmental and Experimental Botany*, 2025. Volume 237. id.106193. 10.1016/j.envexpbot.2025.106193.
11. Zhao F.J., Ma Y., Zhu Y.G., Tang Z., McGrath S.P. Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies. *Environmental Science & Technology*, 2015. 49(2). P. 750–759. https://doi.org/10.1021/es5047099.

Дата першого надходження статті до видання: 16.07.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

УДК 631.46:504.5:574.24
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.27

БІОІНДИКАЦІЙНИЙ ПОТЕНЦІАЛ ҐРУНТОВИХ МІКРООРГАНІЗМІВ У СИСТЕМІ ОЦІНЮВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТУ НА ТЕХНОГЕННО ТРАНСФОРМОВАНИХ ТЕРИТОРІЯХ

Панас Н.Є. (orcid.org/0000-0003-3737-6338)
Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнології імені С.З. Гжицького
вул. Пекарська, 50, 79000, м. Львів
panas.natalia.edu@gmail.com

Метою статті є наукове обґрунтування біоіндикаційного потенціалу ґрунтових мікроорганізмів у системі оцінювання забруднення ґрунту на техногенно трансформованих територіях та формування послідовності використання мікробіологічних показників для раннього виявлення негативних змін стану ґрунтового середовища. Об'єктом дослідження виступають структурні, функціональні, біохімічні та молекулярні характеристики ґрунтових мікробних угруповань, чутливі до дії важких металів, нафтопродуктів, поліциклічних ароматичних вуглеводнів, техногенного засолення й змішаного забруднення. Дослідження має оглядово-аналітичний характер і ґрунтується на порівнянні та систематизації результатів наукових праць, у яких мікробна біомаса, інтенсивність дихання, метаболічний коефіцієнт, ферментативна активність, чисельність окремих еколого-трофічних груп, таксономічна різноманітність та молекулярні маркери використовуються для характеристики порушених ґрунтів. Встановлено, що мікроорганізми здатні реагувати на техногенне навантаження раніше, ніж зміни стають очевидними за морфологічними ознаками ґрунту або рослинного покриву, однак інформативність окремого показника істотно залежить від кислотності, вологості, гранулометричного складу, вмісту органічної речовини та сезону відбору проб. Обґрунтовано необхідність поєднання показників, які характеризують кількість мікробної біомаси, її метаболічну активність, виконання біогеохімічних функцій і перебудову структури мікробіому. Запропоновано систематизацію біоіндикаторів за чотирма групами, а саме кількісними, функціонально-біохімічними, структурними та молекулярно-генетичними. Розроблено послідовність оцінювання, що повинна передбачати вибір референтної ділянки, одночасне визначення фізико-хімічних характеристик і забруднювачів, базове мікробіологічне тестування, оцінку ферментативної та метаболічної активності, молекулярне уточнення змін і комплексну інтерпретацію результатів. Наукова новизна полягає у формуванні системи взаємодоповнювальних критеріїв, яка дозволяє розглядати ґрунтові мікроорганізми як індикатори фактичного біологічного ефекту забруднення, а не як допоміжну характеристику хімічного аналізу. Практичне значення отриманих результатів пов'язане з можливістю використання запропонованої послідовності під час екологічного моніторингу промислових зон, територій видобування корисних копалин, транспортних вузлів, полігонів відходів, урбанізованих земель та інших ділянок із тривалим або комбінованим техногенним навантаженням. *Ключові слова*: ґрунтові мікроорганізми, біоіндикація, забруднення ґрунту, техногенно трансформовані території, мікробіоценоз, ферментативна активність, важкі метали, мікробіом, екологічний моніторинг, біологічна активність ґрунту

Bioindication potential of soil microorganisms in the system for assessing soil contamination in technogenically transformed territories. Panas N.

The purpose of the article is to scientifically substantiate the bioindication potential of soil microorganisms in the system for assessing soil contamination in technogenically transformed territories and to form a sequence for using microbiological indicators for the early detection of adverse changes in the soil environment. The object of the study is the structural, functional, biochemical and molecular characteristics of soil microbial communities that are sensitive to heavy metals, petroleum products, polycyclic aromatic hydrocarbons, technogenic salinisation and mixed contamination. The study is review-based and analytical and relies on the comparison and systematisation of peer-reviewed research in which microbial biomass, respiration intensity, the metabolic quotient, enzymatic activity, abundance of ecological and trophic microbial groups, taxonomic diversity and molecular markers are used to characterise disturbed soils. It is established that microorganisms may respond to technogenic pressure before changes become clearly visible from soil morphology or vegetation characteristics. At the same time, the diagnostic value of an individual microbial parameter is strongly affected by soil acidity, moisture, particle-size composition, organic matter content and sampling season. The study substantiates the need to combine indicators describing the amount of microbial biomass, its metabolic activity, the performance of biogeochemical functions and changes in microbiome structure. Bioindicators are systematised into four groups comprising quantitative, functional-biochemical, structural and molecular-genetic indicators. A stepwise assessment procedure is proposed. It should include the selection of a reference site, simultaneous determination of physicochemical soil properties and contaminants, basic microbiological testing, assessment of enzymatic and metabolic activity, molecular verification of community shifts, and integrated interpretation of the results. The scientific novelty lies in forming a system of complementary criteria that enables soil microorganisms to be considered indicators of the actual biological effect of contamination rather than an auxiliary characteristic of chemical analysis. The practical significance of the results is associated with the possibility of applying the proposed sequence to environmental monitoring of industrial zones, mining

© Панас Н.Є., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

areas, transport hubs, waste disposal sites, urban lands and other territories subjected to long-term or combined technogenic pressure. The proposed approach can improve the ecological interpretation of monitoring data, reveal early-stage biological stress and support the selection of priorities for remediation and further observation. *Key words*: soil microorganisms, bioindication, soil contamination, technogenically transformed territories, microbiocenosis, enzymatic activity, heavy metals, microbiome, environmental monitoring, soil biological activity

Постановка проблеми. Техногенна трансформація територій супроводжується надходженням у ґрунт важких металів, нафтопродуктів, поліциклічних ароматичних вуглеводнів, солей, продуктів горіння, дрібнодисперсного пилу та інших сполук, здатних тривалий час зберігатися у ґрунтовому профілі. Традиційна оцінка забруднення переважно спирається на визначення концентрацій хімічних речовин та їх порівняння з нормативними або фоновими значеннями. Такий підхід надає необхідну інформацію про наявність полютанта, однак не завжди характеризує його біодоступність, сумарну дію декількох забруднювачів і фактичну реакцію живої складової ґрунту. Ґрунтові мікроорганізми безпосередньо контактують із забруднювачами, беруть участь у трансформації органічної речовини та елементів живлення і швидко реагують на зміну фізико-хімічних умов. Саме тому їх чисельність, активність, структура угруповань та функціональні ознаки можуть бути використані для раннього виявлення деградаційних процесів і доповнення хімічного контролю біологічною інформацією [1–3].

Актуальність дослідження. Потреба у біологічно орієнтованому оцінюванні стану ґрунтів зростає разом із розширенням площ промислово порушених, урбанізованих, транспортно навантажених і рекультивованих земель. Техногенно трансформований ґрунт являється відкритою природною системою, у якій дія полютантів поєднується зі змінами кислотності, вологості, аерації, вмісту органічної речовини та рослинного покриву. При такого роду умовах однакова валова концентрація металу або органічного забруднювача може формувати різний біологічний ефект. Дослідження біомаси, дихання, ферментативної активності та структури мікробних угруповань дозволяє оцінити результат такої комплексної дії. Підтверджено, що мікробіологічні характеристики чутливо реагують на забруднення важкими металами, а одночасне використання структурних і функціональних показників суттєво підвищує інформативність оцінювання [3–6]. Разом із цим розвиток високопродуктивного секвенування та підходів meta-omics розширює можливості виявлення змін у мікробіомі, які неможливо повністю охарактеризувати культуральними методами [7].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими і практичними завданнями. Дослідження відповідає сучасним завданням екологічного моніторингу та оцінки впливу антропогенних чинників на наземні екосистеми. Його спрямування узгоджується з необхідністю вдосконалення методів виявлення екотоксикологічних наслідків забруднення, оцінювання здатності ґрунту зберігати біогеохімічні функції та формування наукового підґрунтя для вибору способів відновлення порушених територій. Для практичного моніторингу особливо важливо отримувати інформацію про біологічний ефект забруднення на ранній стадії, коли деградаційні зміни ще можуть бути локалізовані або компенсовані за рахунок рекультиваційних та біоремедіаційних заходів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика використання мікроорганізмів як індикаторів якості ґрунту має розвинене наукове підґрунтя. Т. Ф. Яковишина [1] обґрунтувала доцільність застосування окремих груп мікроорганізмів у біоіндикації забруднення ґрунтів важкими металами та показала зв'язок між мікробіологічними характеристиками і токсичним навантаженням. M. Schloter, P. Nannipieri, S. J. Sørensen та J. D. van Elsas [2] розглядають мікробні характеристики як важливу складову оцінювання якості ґрунту, наголошуючи на потребі пов'язувати таксономічну інформацію з функціональними процесами. У ґрунтовому моніторингу важких металів особливе значення має робота J. Tang та співавторів [3], у якій систематизовано мікробіологічні індекси діагностики забруднення та показано, що реакція мікробної біомаси, дихання, ферментів і структури угруповань змінюється залежно від типу металу й властивостей ґрунту. Експериментальні результати Y. P. Wang та співавторів [4] засвідчили зменшення мікробної біомаси й активності ферментів поблизу мідеплавильного виробництва, що підтверджує чутливість функціональних показників до промислового навантаження. C. Fajardo та співавтори [5] продемонстрували доцільність паралельного оцінювання структурних і функціональних змін мікробіому за забруднення Pb, Cd і Zn. Узагальнення D. Bhaduri та співавторів [6] охоплює мікробну біомасу, дихання, ферментативну активність, молекулярні маркери та аналіз мікробних спільнот як систему біоіндикаторів для деградованих і забруднених ґрунтів. C. Djemiel та співавтори [7] показали, що metabarcoding, metagenomics та інші meta-omics підходи надають можливість формувати сучасні показники біологічної якості ґрунту, хоча окремі методи ще потребують стандартизації для рутинного моніторингу. M. Xu та співавтори [8] встановили зміни співвідношення ферментативних процесів за дії важких металів і обґрунтували використання екологічної стехіометрії ферментів для оцінки ресурсних обмежень мікроорганізмів. Результати C. Su та співавторів [9] на територіях із вугільно-промисловим

навантаженням підтвердили виражені зміни бактеріальних і грибних угруповань, а також активності ґрунтових ферментів під впливом важких металів. На техногенно трансформованій міській території колишнього промислового використання M. P. Mejia та співавтори [10] застосували підходи eDNA для характеристики мікробіому ґрунту з комбінованим забрудненням важкими металами, нафтовими вуглеводнями та іншими речовинами. N. Chowdhury та M. M. Rasid [11] також підтвердили зв'язок між концентраціями важких металів та мікробною й ферментативною активністю ґрунтів. Окремий напрям представлений дослідженнями індикаторних фенотипових реакцій мікроорганізмів. К. С. Крупєй, О. Ф. Рильський, Н. Л. Количева та О. Д. Бобровська [12] довели придатність змін пігментоутворення дріжджів для біоіндикації солей Купруму, що додатково підтверджує можливість використання чутливих метаболічних ознак мікроорганізмів під час екотоксикологічного контролю. Отже, наукові публікації підтверджують значний потенціал мікроорганізмів, однак питання поєднання різних груп показників у єдиній послідовності оцінювання техногенно трансформованих ґрунтів потребує подальшого опрацювання.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Наявні дослідження не формують універсального одиничного мікробіологічного показника, придатного для всіх типів ґрунтів і забруднювачів. Кількість мікроорганізмів може знижуватися внаслідок токсичної дії, але в окремих випадках зростає через розвиток толерантних популяцій. Інтенсивність дихання також не має однозначного трактування, оскільки її підвищення може відображати активне використання доступного субстрату або стресові витрати енергії. Зниження ферментативної активності є чутливим сигналом, проте окремі ферменти по-різному реагують на концентрацію металів, кислотність і вміст органічного вуглецю. Молекулярні методи детально характеризують структуру мікробіому, але потребують порівняння з референтними ґрунтами й функціональними тестами. Відтак, невирішеною частиною проблеми постає формування узгодженої системи оцінювання, яка повинна охоплювати декілька рівнів мікробної реакції та одночасно враховувати природні властивості ґрунту.

Новизна. а основі узагальнення сучасних досліджень систематизовано біоіндикаційні характеристики ґрунтових мікроорганізмів за чотирма взаємопов'язаними групами, а саме кількісними, функціонально-біохімічними, структурними та молекулярно-генетичними. Запропоновано послідовність їх застосування для техногенно трансформованих територій, у якій мікробіологічний результат зіставляється з референтною ділянкою, фізико-хімічними властивостями ґрунту та профілем забруднювачів.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологія дослідження включає аналіз і синтез для узагальнення результатів мікробіологічних та екотоксикологічних досліджень, порівняння для встановлення переваг і обмежень окремих біоіндикаторів, систематизацію для групування показників за характером реакції, а також абстрактно-логічний метод для формування послідовності комплексного оцінювання. Загальнонаукове значення полягає у переході від ізольованого трактування окремого мікробіологічного показника до багаторівневої характеристики біологічної відповіді ґрунту.

Виклад основного матеріалу. Ґрунт являється середовищем із високою просторовою неоднорідністю, тому забруднення в ньому формується як поєднання хімічної присутності полютанта, його доступності для організмів і реакції біологічної складової. Мікроорганізми займають особливе місце в цій системі, оскільки мають короткі генераційні цикли, значну площу контакту з ґрунтовим розчином і високу метаболічну пластичність. Їхня реакція проявляється у зміні кількості клітин, співвідношення еколого-трофічних груп, швидкості дихання, активності ферментів, структури бактеріальних і грибних спільнот, поширеності генів стійкості та інтенсивності окремих метаболічних процесів. При цьому стійкі таксони можуть накопичуватися у забрудненому ґрунті, тоді як чутливі форми зникають або втрачають функціональну активність. Саме поєднання пригнічення, селекції та адаптації формує біоіндикаційний сигнал, який необхідно трактувати комплексно [2–7].

Першою групою показників є кількісні характеристики. До них належать мікробна біомаса, загальна чисельність культивованих бактерій і грибів, а також чисельність окремих еколого-трофічних груп. Зниження мікробної біомаси за високого токсичного навантаження є одним із найбільш відтворюваних сигналів, особливо на територіях металургійного та гірничодобувного впливу [3, 4, 11]. Водночас кількість колонієутворювальних одиниць не повинна використовуватися як самодостатній критерій. Культуральні методи охоплюють лише частину ґрунтового мікробіому, а зростання чисельності окремих груп може бути наслідком селекції стійких організмів. Тому кількісні показники повинні формувати початковий рівень діагностики, який далі доповнюється функціональними ознаками. Другою групою постають функціонально-біохімічні показники. Базальне дихання характеризує загальну метаболічну активність, а метаболічний коефіцієнт, що виражає співвідношення дихання до мікробної біомаси, може вказувати на підвищені енергетичні витрати мікроорганізмів за стресових умов. Особливу діагностичну цінність має активність дегідрогеназ, уреази, фосфатаз, β-глюкозидази, каталази та інших ферментів, пов'язаних із циклами вуглецю, азоту й фосфору. Важкі метали здатні взаємодіяти з ферментативними

системами, змінювати проникність мембран і посилювати оксидативний стрес, що відображається у зменшенні інтенсивності окремих біохімічних процесів [4, 8, 9]. За комбінованого забруднення важливо оцінювати декілька ферментів, оскільки їх різноспрямована реакція дозволяє точніше відокремити токсичне пригнічення від природної мінливості. Третя група охоплює структурні характеристики мікробіоценозу. До них належать співвідношення бактерій і грибів, різноманітність таксонів, відносна чисельність домінантних груп та зміни структури спільноти за даними фосфоліпідних жирних кислот, 16S rRNA, ITS та інших маркерів. Структурна перебудова є особливо інформативною для територій із тривалим техногенним навантаженням, де первинне пригнічення з часом змінюється формуванням адаптованого мікробіому. Дослідження промислових і міських забруднених територій показують, що тривала дія металів та органічних полютантів формує специфічний склад угруповань і підвищує частку толерантних таксонів [5, 9, 10]. Така адаптація не повинна автоматично трактуватися як відновлення ґрунту, оскільки висока стійкість окремих популяцій може поєднуватися зі зменшенням функціонального різноманіття. Четверта група включає молекулярно-генетичні показники. Metabarcoding дозволяє характеризувати таксономічний склад, metagenomics надає інформацію про функціональний потенціал мікробіому, а metatranscriptomics і metaproteomics можуть відображати активні процеси. Для техногенно трансформованих територій перспективним являється аналіз генів стійкості до металів, генів трансформації забруднювачів та функціональних маркерів біогеохімічних циклів. Однак висока деталізація молекулярних даних не скасовує потреби у базових фізико-хімічних і біохімічних тестах. Як наголошується у сучасних оглядах, практичне використання meta-omics повинно супроводжуватися розвитком референтних баз даних і стандартизацією процедур відбору, зберігання та обробки проб [7].

Порівняння груп показників в табл. 1 показує, що біоіндикація повинна бути багаторівневою. Кількісна реакція надає швидкий сигнал, функціональні тести характеризують збереження екологічних процесів, структурні характеристики показують напрям перебудови спільноти, а молекулярні методи розкривають механізми адаптації. На нашу думку, найбільшу практичну цінність для рутинного моніторингу має поєднання мікробної біомаси, дихання, 2–4 ферментативних тестів та одного показника структури мікробного угруповання. Молекулярно-генетичні методи доцільно залучати для ділянок із невизначеним характером впливу, комбінованим забрудненням або необхідністю встановлення механізмів стійкості.

Характер мікробної відповіді залежить від типу техногенного навантаження. Важкі метали переважно формують тривалий селективний тиск, який змінює біомасу, ферментативну активність і структуру спільнот. Нафтопродукти та поліциклічні ароматичні вуглеводні можуть пригнічувати чутливі групи, водночас створюючи субстрат для розвитку спеціалізованих деструкторів. Техногенне засолення та зміна pH обмежують осмотично чутливі

Таблиця 1

Групи мікробіологічних показників та їх біоіндикаційне значення

Група показників	Основні характеристики	Аспекти
Кількісні	Мікробна біомаса C, загальна чисельність бактерій і грибів, чисельність амоніфікаторів, нітрифікаторів, фосфатмобілізувальних та інших еколого-трофічних груп	Зменшення біомаси і чисельності чутливих груп відображає токсичне пригнічення. Зростання частки окремих груп може свідчити про селекцію толерантних популяцій або зміну доступності субстратів
Функціонально-біохімічні	Базальне і субстрат-індуковане дихання, метаболічний коефіцієнт, дегідрогеназна, уреазна, фосфатазна, β-глюкозидазна, каталазна активність, потенційна нітрифікація	Дозволяють визначити, наскільки збережена здатність мікробіоценозу забезпечувати трансформацію органічної речовини та кругообіг елементів. Підвищений метаболічний коефіцієнт може характеризувати стресові енергетичні витрати
Структурні	Співвідношення бактерій і грибів, PLFA-профіль, α- і β-різноманітність, структура бактеріальних та грибних угруповань за 16S rRNA й ITS, відносна чисельність толерантних і чутливих таксонів	Відображають перебудову мікробіоценозу під тривалим техногенним тиском, втрату чутливих груп і формування угруповань із підвищеною стійкістю до забруднювачів
Молекулярно-генетичні	Metabarcoding, metagenomics, metatranscriptomics, функціональні гени циклів C, N, P, гени стійкості до металів та органічних полютантів, маркери біодеградації	Дозволяють виявляти приховані зміни функціонального потенціалу, механізми адаптації та поширення генетично закріпленої стійкості. Формують деталізований профіль реакції мікробіому

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

популяції і змінюють доступність металів. Змішане забруднення ускладнює причинно-наслідкову інтерпретацію, тому повинно оцінюватися за сукупністю біологічних та фізико-хімічних характеристик.

Відтак, на табл. 2 узагальнено типові напрями реакції, але вони не повинні використовуватися як жорсткі порогові значення. Біоіндикація має порівняльний характер. Найбільш коректною основою є референтна ділянка зі схожим типом ґрунту, гранулометричним складом, положенням у рельєфі та режимом зволоження, але без безпосереднього джерела техногенного впливу. Якщо природний аналог відсутній, доцільно використовувати градієнт відстані від джерела або архівні дані моніторингу. Така побудова повинна зменшувати ризик віднесення природної відмінності ґрунтів до наслідків забруднення.

Окреме значення має нормування мікробіологічних результатів. Абсолютні значення біомаси або ферментативної активності суттєво відрізняються між типами ґрунтів. Тому практична оцінка повинна передбачати розрахунок відносної зміни щодо референтного значення за однакової методики. Наприклад, пригнічення ферментативної активності доцільно подавати у відсотках від контролю, а структурні зміни характеризувати через показники різноманіття та відстані між угрупованнями. Водночас збільшення показника не завжди означає покращення. Підвищене дихання за одночасного зменшення біомаси може відображати стрес, а зростання частки резистентних таксонів може свідчити про сильний селективний тиск. Відтак, комплексне трактування повинно виходити з узгодженості декількох реакцій.

Для практичного використання біоіндикаційного потенціалу ґрунтових мікроорганізмів запропоновано послідовність оцінювання, представлену в табл. 3. Її принциповою особливістю є поетапність. На першому етапі формується коректна база порівняння, далі встановлюється профіль забруднювачів і природних властивостей ґрунту, після чого здійснюється мікробіологічний скринінг. Поглиблені структурні та молекулярні методи залучаються до тих ділянок, де базові показники демонструють найбільше відхилення або різноспрямовану реакцію. Така траєкторія повинна сприяти раціональному використанню лабораторних ресурсів та одночасно зберігати достатню екологічну інформативність.

Запропонована послідовність особливо придатна для територій, де забруднення має тривалий характер або формується декількома джерелами. На промислових майданчиках це можуть бути ділянки біля складів сировини, зон розвантаження, шламонакопичувачів та місць осідання пилу. На територіях видобування корисних копалин доцільно порівнювати відвали, зони підніжжя, рекультивовані площі та умовно фонові ділянки. У транспортних вузлах доцільним є градієнт від найбільш навантажених смуг до територій із нижчим рівнем впливу. На полігонах відходів необхідно враховувати можливе надходження фільтрату та просторову неоднорідність органічного навантаження. У кожному випадку мікробіологічний моніторинг повинен бути прив'язаний до конкретного зовнішнього техногенного середовища та джерела впливу.

Важливою перевагою мікробних індикаторів є можливість застосування під час оцінки віднов-

Таблиця 2

Типові напрями реакції ґрунтових мікроорганізмів на техногенні чинники

Техногенний чинник	Механізм впливу	Очікувана мікробіологічна реакція
Важкі метали та металоїди	Зв'язування з клітинними структурами і ферментами, оксидативний стрес, порушення мембранного транспорту, селекція популяцій із механізмами резистентност	Зменшення мікробної біомаси і ферментативної активності за високих концентрацій, зміна структури бактерій і грибів, зростання частки толерантних таксонів, зміни метаболічного коефіцієнта
Нафтопродукти та поліциклічні ароматичні вуглеводні	Токсична дія ароматичних і легких фракцій поєднується з використанням частини вуглеводнів спеціалізованими мікроорганізмами як джерела вуглецю	Зниження різноманіття чутливих груп, тимчасове збільшення дихання, накопичення вуглеводень-деструкторів, перебудова бактеріально-грибного співвідношення
Техногенне засолення, лужний або кислий зсув	Осмотичний стрес і зміна кислотності впливають на мембранні процеси, доступність елементів живлення і рухомість токсичних металів	Зменшення активності чутливих груп, селекція гало- або ацидотолерантних мікроорганізмів, зміни нітрифікації та активності ферментів
Відвали, хвостосховища, промисловий пил	Механічна трансформація ґрунту поєднується з дефіцитом органічної речовини, екстремальними значеннями pH, металами та порушеним водним режимом	Низька біомаса, збіднення функціонального різноманіття, домінування стресостійких популяцій, нестійке відновлення після рекультивації
Змішане техногенне забруднення	Одночасна дія металів, органічних полютантів, солей і змінених фізичних властивостей формує синергічні або антагоністичні ефекти	Різноспрямовані реакції окремих показників, підвищена метаболічна напруга, нестабільність функцій, формування специфічного адаптованого мікробіому

Таблиця 3

Запропонована послідовність використання ґрунтових мікроорганізмів у системі оцінювання забруднення

Етап	Зміст робіт
1. Формування референтної основи	Вибір контрольної або умовно фонової ділянки зі схожими ґрунтовими характеристиками. Визначення глибини відбору, сезону, кількості повторень і просторової схеми пробовідбору
2. Хімічна і фізико-хімічна характеристика	Визначення пріоритетних забруднювачів, pH, електропровідності, вологості, органічного C, основних елементів живлення та інших параметрів, здатних впливати на мікробну активність
3. Базовий мікробіологічний скринінг	Оцінка мікробної біомаси, базального дихання, загальної чисельності та 1–3 функціонально значущих еколого-трофічних груп. Розрахунок відносного відхилення від референтної ділянки
4. Функціонально-біохімічна діагностика	Визначення декількох ферментів, пов'язаних із різними біогеохімічними циклами, та показників метаболічної ефективності. Вибір ферментів залежить від типу забруднення і властивостей ґрунту
5. Структурне та молекулярне уточнення	Застосування PLFA, 16S rRNA, ITS, metabarcoding, metagenomics або цільових функціональних генів на ділянках із найбільшими чи суперечливими змінами
6. Комплексна екологічна інтерпретація	Зіставлення хімічних концентрацій, властивостей ґрунту та набору мікробіологічних реакцій. Виділення ділянок із раннім стресом, вираженим функціональним порушенням, адаптаційною перебудовою або ознаками відновлення

лення. Після рекультивації зниження концентрації доступних форм забруднювачів повинно супроводжуватися відновленням мікробної біомаси, нормалізацією дихання, збільшенням ферментативної активності та поступовим наближенням структури спільноти до референтного стану. Якщо хімічні показники покращуються, але функціональна активність залишається пригніченою, екологічне відновлення не може вважатися завершеним. Разом із цим швидке зростання біомаси за збереження низького різноманіття також потребує обережного трактування. Тому повторні спостереження повинні формувати часовий ряд, який дозволить розрізняти короткочасну реакцію та стійку тенденцію до відновлення. Суттєвим обмеженням біоіндикації залишається методична варіабельність. Результати залежать від глибини та способу відбору, часу зберігання, температури транспортування, підготовки зразків і лабораторної процедури. Для молекулярних досліджень додатково важливими є спосіб екстракції ДНК, вибір праймерів, платформа секвенування та біоінформатичний протокол [7]. Саме тому система моніторингу повинна передбачати незмінність методики в межах одного часово-просторового ряду. Порівняння між різними територіями доцільно здійснювати за стандартизованими процедурами або після відповідної нормалізації даних.

Таким чином, біоіндикаційний потенціал ґрунтових мікроорганізмів полягає у здатності одночасно відображати токсичний ефект, функціональне порушення, селективну перебудову та адаптацію мікробіоценозу. Хімічний аналіз визначає, які речовини і в якій кількості присутні у ґрунті, а мікробіологічна оцінка показує, яким є біологічний наслідок їх присутності. Поєднання цих двох напрямів надає більш повну характеристику техногенно трансформованої території та повинно сприяти обґрунтованому вибору подальших природоохоронних заходів.

Головні висновки. У результаті проведеного дослідження встановлено, що ґрунтові мікроорганізми мають високий біоіндикаційний потенціал у системі оцінювання техногенного забруднення, оскільки швидко реагують на зміну доступності забруднювачів, кислотності, сольового режиму та інших параметрів ґрунтового середовища. Найбільш інформативним є поєднання чотирьох груп показників, які характеризують кількість мікробної біомаси, функціонально-біохімічну активність, структуру мікробіоценозу та молекулярно-генетичні ознаки. Доведені в науковій літературі реакції на важкі метали включають зменшення біомаси й активності ферментів, зміну дихання, перебудову бактеріальних і грибних угруповань та селекцію толерантних популяцій. Визначено, що одиничний показник має обмежену діагностичну цінність, оскільки його зміна залежить від природних властивостей ґрунту та може мати декілька біологічних причин. Запропонована послідовність оцінювання повинна передбачати формування референтної основи, одночасну фізико-хімічну характеристику, базовий мікробіологічний скринінг, функціональну діагностику, структурне або молекулярне уточнення й комплексну інтерпретацію. Такий підхід дозволяє виявляти ранній біологічний стрес, встановлювати ступінь порушення екологічних функцій та оцінювати напрям відновлення ґрунту після природоохоронних заходів.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати можуть бути використані під час розроблення програм локального екологічного

моніторингу промислових зон, гірничодобувних територій, міських територій колишнього промислового використання, транспортних вузлів, полігонів відходів та рекультивованих земель. Запропонована система показників надає можливість формувати пріоритетність ділянок для поглибленого аналізу, контролювати ефективність рекультивації та обґрунтовувати потребу у біоремедіації. Перспективи подальших досліджень пов'язані з експериментальною апробацією запропонованої послідовності на різних типах ґрунтів нашої країни, визначенням найбільш стабільних комбінацій мікробіологічних показників для окремих типів техногенного навантаження та формуванням референтних діапазонів з урахуванням сезонності й ґрунтово-кліматичних особливостей.

Література

1. Яковишина Т. Ф. Використання мікроорганізмів, як біоіндикаторів забруднення важкими металами, в системі екологічного моніторингу ґрунтів. Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Агрономія і біологія». 2012. Вип. 2. С. 197–201. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vsna_agro_2012_2_44.
2. Schloter M., Nannipieri P., Sørensen S. J., van Elsas J. D. Microbial indicators for soil quality. Biology and Fertility of Soils. 2018. Vol. 54, No. 1. P. 1–10. DOI: https://doi.org/10.1007/s00374-017-1248-3.
3. Tang J., Zhang J., Ren L., Zhou Y., Gao J., Luo L., Yang Y., Peng Q., Huang H., Chen A. Diagnosis of soil contamination using microbiological indices: A review on heavy metal pollution. Journal of Environmental Management. 2019. Vol. 242. P. 121–130. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.061.
4. Wang Y. P., Shi J. K., Wang H., Lin Q., Chen X. C., Chen Y. X. The influence of soil heavy metals pollution on soil microbial biomass, enzyme activity, and community composition near a copper smelter. Ecotoxicology and Environmental Safety. 2007. Vol. 67, No. 1. P. 75–81. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2006.03.007.
5. Fajardo C., Costa G., Nande M., Botías P., García-Cantalejo J., Martín M. Pb, Cd, and Zn soil contamination: Monitoring functional and structural impacts on the microbiome. Applied Soil Ecology. 2019. Vol. 135. P. 56–64. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.10.022.
6. Bhaduri D., Sihi D., Bhowmik A., Verma B. C., Munda S., Dari B. A review on effective soil health bio-indicators for ecosystem restoration and sustainability. Frontiers in Microbiology. 2022. Vol. 13. Article 938481. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.938481.
7. Djemiel C., Dequiedt S., Karimi B., Cottin A., Horrigue W., Bailly A., Boutaleb A., Sadet-Bourgeteau S., Maron P.-A., Chemidlin Prévost-Bouré N., Ranjard L., Terrat S. Potential of Meta-Omics to Provide Modern Microbial Indicators for Monitoring Soil Quality and Securing Food Production. Frontiers in Microbiology. 2022. Vol. 13. Article 889788. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.889788.
8. Xu M., Cui Y., Beiyuan J., Wang X., Duan C., Fang L. Heavy metal pollution increases soil microbial carbon limitation: Evidence from ecological enzyme stoichiometry. Soil Ecology Letters. 2021. Vol. 3. P. 230–241. DOI: https://doi.org/10.1007/s42832-021-0094-2.
9. Su C., Xie R., Liu D., Liu Y., Liang R. Ecological Responses of Soil Microbial Communities to Heavy Metal Stress in a Coal-Based Industrial Region in China. Microorganisms. 2023. Vol. 11, No. 6. Article 1392. DOI: https://doi.org/10.3390/microorganisms11061392.
10. Mejia M. P., Rojas C. A., Curd E., Renshaw M. A., Edalati K., Shih B., Vincent J., Lin M., Nguyen M., Wayne R. K., Jessup K., Parker S. S. Soil Microbial Community Composition and Tolerance to Contaminants in an Urban Brownfield Site. Microbial Ecology. 2023. Vol. 85, No. 3. P. 998–1012. DOI: https://doi.org/10.1007/s00248-022-02061-1.
11. Chowdhury N., Rasid M. M. Heavy metal concentrations and its impact on soil microbial and enzyme activities in agricultural lands around ship yards in Chattogram, Bangladesh. Soil Science Annual. 2021. Vol. 72, No. 2. Article 135994. DOI: https://doi.org/10.37501/soilsa/135994.
12. Крупєй К. С., Рильський О. Ф., Количева Н. Л., Бобровська О. Д. Каротиносинтезувальні дріжджі як модельні організми для біоіндикації солей Купруму (II) у водних екосистемах. Екологічні науки. 2025. № 1(58). С. 199–207. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.1-58.33.
13. Криштанович, М., & Силкін, О. Оцінювання стратегічних напрямів реалізації державно-приватного партнерства в царині безпекового розвитку агропромислового сектора. Socio-Economic Relations in the Digital Society, 1(55), 2025, 44-55. https://doi.org/10.55643/ser.5.55.2025.587

Дата першого надходження статті до видання: 27.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

УДК 911.52:711.4:332.3(477.46)
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.28

МІСЬКЕ ЗЕМЛЕКОРИСТУВАННЯ І ЙОГО ВПЛИВ НА ЛАНДШАФТИ ЧЕРКАЩИНИ

Сопова Н.В.[1,2] (orcid.org/0000-0003-0597-5598)
Сопов Д.С.[2] (orcid.org/0000-0002-2684-4688)
[1]Державний біотехнологічний університет
вул. Алчевських, 44, 61002, м. Харків
[2]Одеський державний аграрний університет
вул. Канатна, 99, 65039, м. Одеса
lnau.sopova@gmail.com, odau.sopov@gmail.com

У статті досліджено особливості міського землекористування Черкаської області та його вплив на трансформацію природних ландшафтів у сучасних умовах урбанізації. Обґрунтовано актуальність вивчення міських земель як одного з ключових чинників формування урболандшафтів, що визначають екологічний стан територій, інтенсивність антропогенного навантаження та якість життя населення. Проаналізовано сучасну структуру земельного фонду найбільших міст Черкаської області, охарактеризовано співвідношення земель різних категорій, зокрема сільськогосподарських, забудованих, рекреаційних, лісових та водного фонду. Особливу увагу приділено аналізу динаміки забудованих земель, що засвідчила стійку тенденцію до розширення площ житлової та промислової забудови як наслідок урбанізаційних процесів і розвитку господарської діяльності.

У роботі розкрито особливості просторової структури забудови найбільших міст регіону, визначено співвідношення земель житлової, промислової та рекреаційної забудови, а також площ зелених насаджень. На основі аналізу статистичних матеріалів здійснено оцінювання рівня антропогенного навантаження на урболандшафти шляхом зіставлення питомої ваги територій, зайнятих житловими та промисловими об'єктами, із часткою зелених насаджень. Встановлено, що найвищий рівень антропогенного навантаження характерний для міст Черкаси та Багачеве, високий – для міста Сміла, середній – для Канева та Умані, тоді як найнижчі показники зафіксовано у Золотоноші. Показано, що основними чинниками посилення антропогенного впливу є висока концентрація промислових підприємств, інтенсивна житлова забудова та недостатня забезпеченість міських територій зеленими насадженнями.

Доведено, що подальший розвиток міських територій має здійснюватися на засадах збалансованого землекористування з урахуванням екологічних, соціальних і економічних аспектів. Обґрунтовано доцільність застосування територіального зонування як ефективного інструменту оптимізації використання міських земель, удосконалення планувальної структури міст, розширення площ зелених насаджень та зменшення антропогенного навантаження на урболандшафти. Практичне значення дослідження полягає у можливості використання отриманих результатів під час розроблення стратегій просторового розвитку, схем землеустрою, програм охорони земельних ресурсів і забезпечення екологічної безпеки міст Черкаської області. *Ключові слова:* міське землекористування, урбанізація, урболандшафти, антропогенне навантаження, земельні ресурси, забудовані землі, промислова забудова, житлова забудова, зелені насадження, територіальне зонування, просторове планування, ландшафти Черкаської області, екологічна оптимізація землекористування.

Urban land use and its impact on the landscapes of the Cherkasy region. Sopova N., Sopov D.

The article examines the characteristics of urban land use in the Cherkasy region and its impact on the transformation of natural landscapes amidst contemporary urbanization. It substantiates the importance of studying urban lands as a key factor in shaping urban landscapes, which determine the ecological state of territories, the intensity of anthropogenic pressure, and the population's quality of life. The study analyzes the current land-use structure of the Cherkasy region's largest cities and characterizes the proportions of various land categories – specifically agricultural, built-up, recreational, and forest lands, as well as water bodies. Particular attention is paid to analyzing the dynamics of built-up land, which revealed a steady trend toward the expansion of residential and industrial areas as a result of urbanization processes and the development of economic activity.

The study examines the spatial structure of built-up areas in the region's largest cities and determines the proportions of land allocated for residential, industrial, and recreational development, as well as green spaces. Based on an analysis of statistical data, the level of anthropogenic pressure on urban landscapes is assessed by comparing the share of land occupied by residential and industrial facilities with the proportion of green spaces. It has been established that the highest level of anthropogenic pressure is characteristic of the cities of Cherkasy and Bahacheve; a high level is observed in Smila; a moderate level in Kaniv and Uman; while the lowest indicators were recorded in Zolotonosha. The study demonstrates that the primary factors intensifying anthropogenic impact are the high concentration of industrial enterprises, intensive residential development, and an insufficient amount of green space within urban areas.

It has been established that the further development of urban areas must be based on balanced land use, taking into account environmental, social, and economic aspects. The study substantiates the advisability of using territorial zoning as an effective tool for optimizing urban land use, improving urban planning structures, expanding green spaces, and reducing the anthropogenic load on urban landscapes. The practical significance of the study lies in the potential to use the obtained results when developing spatial development

© Сопова Н.В., Сопов Д.С., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

strategies, land-use planning schemes, and programs for land resource protection and the assurance of environmental safety in the cities of the Cherkasy region. *Key words:* urban land use, urbanization, urban landscapes, anthropogenic load, land resources, built-up areas, industrial development, residential development, green spaces, territorial zoning, spatial planning, landscapes of Cherkasy region, ecological optimization of land use.

Метою статті є дослідження особливостей міського землекористування Черкаської області, аналіз його сучасної структури та динаміки, оцінювання рівня антропогенного навантаження на урболандшафти найбільших міст регіону, а також обґрунтування основних напрямів оптимізації використання міських земель для забезпечення екологічно збалансованого розвитку територій.

Методи і теорія. Теоретичною основою дослідження є сучасні положення географії, ландшафтознавства, урбаністики та землекористування щодо функціонування міських територій і трансформації природних ландшафтів під впливом антропогенної діяльності. У процесі дослідження застосовано комплекс загальнонаукових і спеціальних методів, зокрема аналіз і синтез, порівняльно-географічний, статистичний, картографічний та системний методи. Для оцінювання структури міського землекористування використано метод аналізу статистичних даних, а для визначення рівня антропогенного навантаження на урболандшафти – розрахунковий метод, заснований на співвідношенні площ житлової та промислової забудови із площею зелених насаджень. Інформаційну базу дослідження становили статистичні матеріали по земельних ресурсах досліджуваного регіону, а також нормативно-правові документи у сфері земельних відносин та офіційні дані щодо використання земель найбільших міст Черкаської області.

Виклад основного матеріалу. З поширенням урбанізації в будь-якій країні настає зменшення площ сільськогосподарських земель. Найбільшою мірою відведення земельних ділянок сільськогосподарського призначення здійснюється для потреб промисловості та будівництва. Саме промислова й будівельна діяльність пов'язані не лише з фактичним знищенням ґрунтового покриву, а й вийманням значних об'ємів мас гірських порід.

Промислова та будівельна діяльність у Черкаській області зосереджені, головним чином, у містах, тобто несільськогосподарське навантаження на землі в регіоні має переважно точковий характер. Уявлення про співвідношення площ земель різних категорій у найбільших містах Черкащини дає таблиця 1.

З таблиці 1 видно, що серед усіх категорій земель найбільших міст Черкащини явну перевагу мають забудовані землі (виняток становить лише м. Золотоноша, де найбільша площа припадає на сільськогосподарські землі; це пов'язано з тим, що до складу Золотоніської міської громади входять сільські населені пункти).

Представлене в таблиці 1 співвідношення сільськогосподарських і забудованих земель є цілком закономірним для міської території. Важливо зауважити, що з шести найбільших міст Черкаської області три (в тому числі обласний центр) розташовані в Черкаському районі. Наявність кількох осередків досить щільної забудови в його межах не може не впливати на загальну картину та рівень антропогенного навантаження на ландшафти району.

Серед забудованих земель Черкаської області провідні місця посідають землі, які використовуються для відпочинку та інші відкриті землі, землі під житловою забудовою та землі промисловості (в тому числі гірничі виробки та пов'язані з ними споруди). На нашу думку, найважливішу роль у перетворенні ландшафтів відіграє гірничодобувна промисловість, підприємства та виробництва якої змінюють усі ком-

Таблиця 1

Розподіл земель за категоріями у найбільших містах Черкаської області у га, станом на 2016 рік

Місто	Загальна площа земель	Сільсько-господарські землі	Ліси та інші лісовкриті площі	Забудовані землі	Відкриті заболочені землі	Землі без рослинного покриву або з незначним рослинним покривом	Води
Багачеве	1101,4	358,1	26,4	649,1	32,3	26,5	9,1
Золотоноша	4463,4	2311,6	315,3	1535,5	244,0	6,0	51,0
Канів	1742,0	288,2	-	1088,7	-	198,1	167,0
Сміла	3985,0	1274,3	170,0	1911,9	117,8	123,9	387,1
Умань	4107,8	851,6	155,5	2728,4	-	147,6	224,7
Черкаси	7759,0	1587,8	53,3	5977,6	11,3	64,1	64,9

Джерело: сформовано за даними [1]

поненти ландшафту включно з найстійкішим – літогенним.

Динаміка змін площі забудованих земель у згаданих вище містах Черкащини представлена в таблиці 2.

Аналіз вищенаведеної таблиці свідчить про неухильне зростання площ забудованих земель на Черкащині впродовж 15 років (2001–2016). Виняток становить лише центральна частина області в період 2001–2006 рр. Зазначений виняток ми пояснюємо, з одного боку, збільшенням площі відкритих земель без рослинного покриву або з особливим рослинним покривом (ярів та інших «незручних» земель) у м. Сміла та, з іншого боку, зменшенням вуглевидобутку навколо м. Багачеве. Загалом, досить істотне збільшення площ земель під забудовою є цілком закономірним з огляду на повсюдне поширення урбанізації, що супроводжується зростаючою забудовою.

Важливе значення має співвідношення площ земель, які використовуються для відпочинку та інших відкритих земель, земель під житловою (з розрізненням за поверховістю) та промисловою забудовою (таблиця 3).

З таблиці видно, що, по-перше, найбільше забудованих земель міститься в обласному центрі – м. Черкаси. Водночас іще більше значення має факт, що саме на Черкаси припадає переважна частка земель під промисловою забудовою. Безумовно, це є вагомим чинником антропогенного тиску на ландшафт, екологічними наслідками чого є просідання земної поверхні, підтоплення території, посилення несприятливих природних геоморфологічних процесів тощо.

Беручи до уваги структуру забудованих земель в адміністративних районах Черкаської області, ми констатуємо, що у трьох районах із чотирьох (Звенигородський, Золотоніський, Уманський) співвідношення основних видів забудови майже однакове – найбільша частка (42–44 %) припадає на землі, що використовуються для відпочинку, та інші відкриті землі; на другому місці перебувають землі під житловою забудовою (11–14 %), на третьому – землі промисловості, частка яких становить 4–8 %. Дещо іншим є співвідношення в Черкаському районі, в якому – як зазначалося вище – за рахунок територій міст Канів, Сміла та – особливо – Черкаси площа під житловою забудовою є вищою, порівняно з рештою області, її частка складає 16,01 %. Водночас помітно нижчою є площа земель, які використовуються для відпочинку та інших відкритих земель, – лише 38,11 % від загальної площі. При цьому на землі про-

Таблиця 2

Динаміка забудованих земель у найбільших містах Черкаської області

Місто	Роки			
	2001	2006	2011	2016
Багачеве	649,3642	648,6397	649,0752	649,0752
Золотоноша	1391,9813	1504,2186	1512,3856	1535,497
Канів	817,5145	890,6792	1041,9999	1088,7489
Сміла	1873,8329	1847,3221	1864,8598	1911,9462
Умань	2610,1142	2640,6936	2728,4063	2728,4204
Черкаси	5051,9197	5638,6489	5953,9511	5977,5998

Джерело: сформовано за даними [1]

Таблиця 3

Співвідношення площ земель, які використовуються для відпочинку та інших відкритих земель, земель під житловою та промисловою забудовою в деяких містах Черкаської області станом на 2016 р.

Місто	Площа, га				
	Земель для відпочинку та ін. відкритих земель	Житлової забудови, у. т. ч.			Промислової забудови
		Всього	Одно- та двоповерхової	З трьома та більше поверхами	
Багачеве	186,1387	242,8913	177,8544	65,0369	85,9557
Золотоноша	527,4384	225,8487	195,7514	30,0973	186,3743
Канів	500,7301	299,0341	272,8175	26,2166	103,8007
Сміла	382,9235	700,1126	454,5419	245,5707	297,3905
Умань	842,1291	629,5797	521,6432	107,9365	221,4935
Черкаси	2093,9964	1222,5998	858,5606	364,0392	1061,8494

Джерело: сформовано за даними [1]

мисловості припадає практично така само частка, як і для всієї Черкащини (8,59 %).

Вищенаведені дані свідчать про істотно вище антропогенне навантаження, викликане будівельною діяльністю, на ландшафти в Черкаському районі порівняно з рештою території області.

Міські землі становлять один із найважливіших складових земельного фонду, вони є ресурсним виявом літогенної основи та ґрунтового компоненту міського ландшафту та істотною мірою визначають умови життя населення міст.

У зв'язку з приватизацією земель несільськогосподарського призначення, що триває вже кілька десятиріч, їм приділяється пильна увага, особливо в контексті прав на власність. Безпрецедентна концентрація населення в міських населених пунктах і стрімкий розвиток підприємництва за постсовєтської доби, зокрема будівельного бізнесу, створює з міських земель, що є незамінним ресурсом соціально-економічного розвитку міст і селищ, також суттєве джерело отримання прибутків, часто сумнівних із погляду закону.

Міські землі посідають окреме місце щодо інших категорій земель. Відповідно до Земельного кодексу України [2], міські землі є землями житлової та громадської забудови, хоча, з нашого погляду, вони мали б включати також землі водного фонду, оздоровчого, рекреаційного, історико-культурного призначення, розташовані в межах міст.

Джерела, присвячені, головним чином, питанням земельних відносин і землекористування в містах, тлумачать поняття «міські землі» неоднаково. На думку одних авторів, це землі, які перебувають у державній, комунальній та приватній власності; інші науковці трактують їх як землі, які є власністю виключно територіальної громади [3].

Переважна більшість наявних типологій і класифікацій міських земель створено з економічного та юридичного погляду (в аспектах власності, вартості тощо). На нашу думку, з природничих позицій, зокрема в контексті наук про Землю, доречнішою була б класифікація або типологія цієї категорії земель за призначенням і характером використання, тому що ці критерії прямо пов'язані з природними умовами, зокрема рельєфом і ґрунтовим покривом.

Згідно зі статтею 19 Земельного кодексу України, за основним цільовим призначенням землі України, зокрема міських населених пунктів, поділяються на такі категорії: 1) землі сільськогосподарського призначення; 2) землі житлової та громадської забудови; 3) землі природно-заповідного та іншого природоохоронного призначення; 4) землі оздоровчого призначення; 5) землі рекреаційного призначення; 6) землі історико-культурного призначення; 7) землі лісогосподарського призначення; 8) землі водного фонду; 9) землі промисловості, транспорту, електронних комунікацій, енергетики, оборони та іншого призначення. Крім того, окремо виділяються землі запасу [2]. Плани землеустрою міських населених пунктів визначають режим землекористування, в тому числі зон зелених насаджень, зон затоплення й підтоплення, зон прояву небезпечних і несприятливих природних і техногенних процесів тощо.

На території Україні землі населених пунктів, зокрема міст, охоплюють близько 0,5 % від усієї її площі й практично повсюдно (крім тимчасово окупованих росією територій і територій, що постійно піддаються ворожим обстрілам) характеризуються однаковими проблемами – економічними, соціальними, екологічними тощо. З цього погляду вони і є об'єктом різнобічних наукових досліджень. Проблеми використання міських земель знайшли часткове відображення у працях численних українських учених і практиків [3–13; 16], проте, як окремий об'єкт дослідження міські землі ще недостатньо розглянуті в контексті формування урболандшафтів. Вони переважно все ще розглядаються лише як місця для житлового, дорожнього та промислового будівництва, прокладання різноманітних комунікацій тощо. Проте, міські землі насправді мають не лише істотне економічне, а й загалом суспільне значення, позаяк вони слугують не лише територією для проживання населення, а й охоплюють вагому частину виробничого простору, тісного пов'язаного з природними ресурсами.

Заснування населених пунктів, деякі з яких за певних умов набували значення й статусу міст, зумовлювалося різними факторами. Так, природними чинниками селитебного освоєння території є особливості рельєфу, клімату, рівень водозабезпеченості, а також забезпеченості мінеральними, земельними, біологічними та іншими ресурсами.

Для території сучасної Черкаської області головним природним фактором заснування населених пунктів віддавна була забезпеченість водними й земельними ресурсами, що загалом притаманно історії розвитку осілих землеробських народів. При цьому для утворення міст найважливіше значення мала наявність річок як транспортних магістралей, якими перевозилася товарна сільськогосподарська продукція. Для сьогоднішньої Черкащини такими річками здавна були, передовсім, Дніпро та – меншою мірою – Рось.

У Черкаській області станом на 01.01.2022 р. загальна кількість населених пунктів становила 855, у тому числі – 16 міст, 116 селищ і 723 села [14]. Із загальної кількості населених пунктів 6 – це міста із загальною площею близько 10 тис. км^2 і населенням понад 20 тис. осіб. Саме ці міста й становлять матеріал для дослідження міського землекористування на Черкащині.

Враховуючи чисельність і густоту населення, масштаби відчуження земель під промислові й житлові будівлі та споруди, а також рівень забезпеченості містян зеленими насадженнями (табл. 4), за методикою А. А. Айруні ми визначили рівень антро-

Таблиця 4

Складові формування антропогенного навантаження на урболандшафти Черкаської області у % до площі міста

Місто	Загальна площа, га	Чисельність населення (2001 р.), осіб	Густота населення (осіб/га)	Частка площі під промисловими та житловими спорудами (%; $П_с$)	Площа зелених насаджень (%; $П_н$)
Багачеве	1101,4	20027	18,18	29,86	3,08
Золотоноша	4463,4	28375	6,36	9,24	5,98
Канів	1742,0	26735	15,35	23,12	4,59
Сміла	3985,0	68671	17,23	25,03	2,04
Умань	4107,8	87843	21,38	20,72	3,75
Черкаси	7759,0	292761	37,73	29,44	4,25
Разом	23158,6	524412	19,37	22,90	3,95

Джерело: сформовано за даними [1]

Таблиця 5

Антропогенне навантаження на урболандшафти Черкаської області (частка в загальній площі міст / бали / рівень антропогенного навантаження)

Місто	Частка площ під промисловими та житловими спорудами (%; $П_с$)		Частка площ зелених насаджень (%; $П_н$)		Рівень антропогенного навантаження ($А_н$; бали)
	Питома вага	Бали	Питома вага	Бали	
Багачеве	29,86	1	3,08	3	26,78 (4)
Золотоноша	9,24	4	5,98	1	3,26 (1)
Канів	23,12	2	4,59	2	18,53 (2)
Сміла	25,03	2	2,04	4	22,99 (3)
Умань	20,72	3	3,75	3	16,97 (2)
Черкаси	29,44	1	4,25	2	25,19 (4)

Джерело: сформовано за даними [1]

погенного навантаження на ландшафти найбільших міст Черкаської області за формулою:

$$А_н = П_с - П_н$$

де $А_н$ – рівень антропогенного навантаження;

$П_н$ – середня питома вага площі зелених насаджень;

$П_с$ – середня питома вага під промисловими та житловими спорудами.

На підставі проведених розрахунків визначено рівень антропогенного навантаження на урболандшафти (табл. 5).

Антропогенне навантаження через надмірну щільність промислової та житлової забудови деякою мірою компенсується зеленими насадженнями. Дуже високий рівень антропогенного навантаження (4 бали) притаманний містам Багачеве та Черкаси, що цілком закономірно – Багачеве є центром гірничодобувної промисловості (видобуток бурого вугілля), який виник лише в середині XX ст., а отже – забудовувався переважно багатоповерховими будинками; Черкаси є адміністративним і водночас потужним промисловим центром (великі підприємства хімічної промисловості), який найінтенсивніше забудовувався у другій половині XX ст.

Високий рівень антропогенного навантаження на урболандшафти (3 бали) властивий м. Сміла – промисловому центрові з давнім (а з кінця XIX ст., тобто часу утворення залізничного вузла – станція ім. Т. Шевченка – також інтенсивним) освоєнням.

Середній рівень (2 бали) мають Канів і Умань – міста, що відзначаються значною давністю заснування (Каневу близько 950 років, Умані – понад 400). Істотне переважання в цих містах одно- та двоповерхової забудови зменшує антропогенне навантаження на рельєф і ландшафт. Крім того, в межах цих міст порівняно мало підприємств важкої промисловості.

Низьким рівнем антропогенного навантаження на урболандшафти характеризується м. Золотоноша, що розташоване на лівому березі Дніпра. Саме в цьому місті набагато меншою, ніж в інших містах Черкаської області, є частка площ земель під житловою й промисловою забудовою, та водночас м. Золотоноша має найвище серед міст Черкащини населення (понад 20 тис. осіб) та частку площ під зеленими насадженнями.

Отже, схеми землекористування в Черкасах, Багачевому, а також Смілі потребують істотного, неформального коригування з метою зменшення рівня антропогенного навантаження на урболандшафти. Зокрема, існує першочергова необхідність у розширенні площ зелених насаджень.

Задля оптимізації землекористування порівняно нещодавно став застосовуватися метод територіального зонування (зонінґу), сутність якого розкрита у статті 180 Земельного кодексу України [2]. Зонінґ являє собою засіб забезпечення землекористування для забезпечення різних суспільних потреб, причому цільове призначення визначається не для однієї земельної ділянки, а для кількох суміжних ділянок, які утворюють функціональну зону [15].

Висновки. Антропогенне перетворення компонентів ландшафту найбільше проявляється на землях міських населених пунктів, де розвиток житлової, промислової та транспортної інфраструктури зумовлює трансформацію природних комплексів, скорочення площ зелених насаджень і зростання техногенного навантаження. За таких умов земля в межах міст виступає обмеженим природним ресурсом, що потребує раціонального використання та впровадження сучасних підходів до просторового планування і територіального зонування.

Результати дослідження свідчать, що міста Черкаської області характеризуються різним рівнем антропогенного навантаження, який визначається особливостями структури землекористування, часткою житлової й промислової забудови та забезпеченістю зеленими насадженнями. Це обумовлює необхідність диференційованого підходу до управління земельними ресурсами з урахуванням природних і соціально-економічних особливостей кожного міста.

Розроблення науково обґрунтованих моделей розвитку міст Черкаської області сприятиме оптимізації землекористування, підвищенню екологічної стійкості урболандшафтів, розширенню площ озеленення, раціональному використанню міських територій та впровадженню принципів сталого розвитку у систему просторового планування.

Література

1. Фондові матеріали Головного управління Держгеокадастру у Черкаській області. URL: https://cherkaska.land.gov.ua
2. Земельний кодекс України: Закон України від 25.10.2001 № 2768-III (зі змінами). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14#Text
3. Богачов С. В. Економіко-правові проблеми господарювання міста. *Економіка та держава.* 2008. № 12. С. 7–8. URL: http://www.economy.in.ua/?op=1&z=4&i=2
4. Бондар О. Г. Об’єкти права державної власності на землю в умовах земельної реформи в Україні: проблеми визначення. *Вісник Харківського національного університету внутрішніх справ*. 2000. № 10. С. 256–259.
5. Дехтяренко Ю. Ф., Драпіковський О. І., Іванова І. Б. Регулювання земельних відносин у сучасному місті: монографія. За ред.: В. М. Вакуленка, М. К. Орлатого. Київ: Вид-во НАДУ, 2009. 154 с.
6. Драпіковський О. І., Іванова І. Б. Умова і чинники, що визначають ринкову вартість земельних ділянок сільськогосподарського призначення. *Землевпорядний вісник.* 2010. № 6. С. 38–40.
7. Драпіковський О. І., Іванова І. Б. Нові тенденції в розвитку системи землекористування Києва. *Часопис картографії*. 2013. Випуск 9. С. 48–62.
8. Кулаковський Ю. П. Екологічне законодавство в системі управління природокористуванням. *Продуктивні сили і регіональна економіка* : збірник наукових праць. Київ: РВПС України НАН України, 2004. С. 88–95.
9. Кулаковський Ю. П. Економічні методи управління природокористуванням в сучасних умовах. *Вісник Національного університету водного господарства і природокористування.* 2004. Випуск 4(28). Рівне: НУВГП. Ч. 4. С. 248–253.
10. Кулаковський Ю. П. Стратегія управління земельними ресурсами міста в умовах ринку (на прикладі м. Києва). *Вісник Українського державного університету водного господарства та природокористування*. 2004. Випуск 2(26). Ч. 2. С. 526 –531.
11. Кулаковський Ю. П. Особливості реформування земельних відносин у населених пунктах. *Економіка АПК*. 2004. № 2. С. 16–19.
12. Муховиков А. М. Муніципалізація земель: проблеми правового забезпечення, менеджменту, проектування. *Землевпорядкування.* 2003. № 4. С. 9–12.
13. Муховиков А. М., Новаковський Л. Я. Комунальна власність на землю. Київ: Урожай, 2005. 148 с.
14. Черкаська область. *Вікіпедія (Вільна енциклопедія)* : веб-сайт. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Черкаська_область
15. Осипчук С. О. Про охорону земель в Україні. *Землевпорядний вісник.* 2006. № 2. С. 28–36.
16. Sopova N. V. Land use structure in Cherkasy region: formation, current state, dynamics. *Екологічні науки: науково-практичний журнал*. 2025. № 3(60). С. 61–66. URL: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.3-60.11

Дата першого надходження статті до видання: 24.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

УДК 504.06:606:631.8
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.29

БІОКОНВЕРСІЯ ГНОЮ ВРХ МЕТОДОМ ІНТЕГРОВАНОГО АЕРОБНОГО КОМПОСТУВАННЯ ТА ВЕРМІКУЛЬТИВУВАННЯ

Шевченко Н.О. (orcid.org/0000-0001-6722-9326),
Понікарчик С.В. (orcid.org/0009-0005-3152-3255)
Уманський національний університет
вул. Інститутська, 1, 20300, Умань
shevchenkonata24@gmail.com, Psv_s@ukr.net

У статті представлено результати комплексного експериментального дослідження ефективності технології прискореного аеробного компостування гною великої рогатої худоби (ВРХ) із використанням спеціалізованих біоінокулянтів та наступною біогуміфікацією субстрату за участю вермікультури. Встановлено, що застосування консорціумів термофільних целюлозолітичних бактерій та актиноміцетів забезпечує чітку стадійність біотермічного процесу: мезофільну фазу протягом перших трьох діб (підняття температури з 18 до 42 °С) та термофільну фазу з четвертої доби із стабілізацією температури в ядрі бурту в межах 62–67 °С. Утримання термофільного режиму понад 5 діб гарантує повну санацію біомаси від патогенних ентеробактерій та життєздатного насіння бур'янів за загального циклу дозрівання добрива у 21–24 доби. Завдяки підтримці концентрації кисню в порах субстрату на рівні понад 10% шляхом періодичної механічної аерації повністю заблоковано розвиток анаеробних зон, що радикально мінімізує емісію токсичних летких сполук.

Досліджено динаміку фізико-хімічних та агрохімічних показників на різних етапах переробки. Зафіксовано оптимізацію pH середовища у бік нейтральних значень (6,9–7,2), зниження вологості до 42–45% та інтенсивне накопичення гумінових кислот, концентрація яких зростає з 2,1% у вихідній суміші до 8,4% у готовому компості та досягає максимуму у 12,6% у вермікомпості. Встановлено ефект концентрування макроелементів у сухій речовині: загального азоту – до 2,8–3,1%, фосфору (P_2O_5) – до 2,4–2,6% та калію (K_2O) – до 2,1–2,3%. За допомогою методу біотестування на тест-культурі *Cucumis sativus* L. доведено глибоку детоксикацію субстрату. Критично висока фітотоксичність вихідного гною (індекс гермінації 35%, пригнічення коренів на –45%) повністю нівелюється за використання комплексного біоінокулянта на основі штамів *Bacillus subtilis* та *Azotobacter chroococcum*, що підвищує індекс гермінації до 95% та забезпечує приріст довжини коренів на +22%. Фінальне вермікомпостування максимізує індекс гермінації до 97% та приріст коренів до +25%, що підтверджує повний перехід лабільних речовин у стабільні гумусові комплекси. Обґрунтовано доцільність промислового масштабування розробленої технології на базі тваринницьких комплексів. *Ключові слова:* аеробне компостування, гній ВРХ, біоінокулянт, *Bacillus subtilis*, *Azotobacter chroococcum*, вермікомпост, гумінові кислоти, фітотоксичність, індекс гермінації.

Bioconversion of Cattle Manure by Integrated Aerobic Composting and Vermicomposting. Shevchenko N., Ponikarchyk S.

The paper presents the results of a comprehensive experimental study on the efficiency of accelerated aerobic composting technology for cattle manure using specialized bioinoculants, followed by subsequent biohumification of the substrate involving vermiculture. It was established that the application of consortia of thermophilic cellulolytic bacteria and actinomycetes ensures a distinct staging of the biothermal process: a mesophilic phase during the first three days (with a temperature rise from 18 to 42 °C) and a thermophilic phase starting from the fourth day, with temperature stabilization in the core of the windrow within 62–67 °C. Maintaining this thermophilic regime for more than 5 days guarantees complete sanitation of the biomass from pathogenic enterobacteria and viable weed seeds within a total fertilizer maturation cycle of 21–24 days. Due to the maintenance of oxygen concentration in the substrate pores at a level above 10% through periodic mechanical aeration, the development of anaerobic zones is completely blocked, which radically minimizes the emission of toxic volatile compounds.

The dynamics of physicochemical and agrochemical parameters at various stages of processing were investigated. An optimization of the medium pH towards neutral values (6.9–7.2), a decrease in moisture content to 42–45%, and an intensive accumulation of humic acids were recorded, with their concentration increasing from 2.1% in the initial mixture to 8.4% in the finished compost, reaching a maximum of 12.6% in the vermicompost. The effect of macronutrient concentration in the dry matter was established: total nitrogen up to 2.8–3.1%, phosphorus (P_2O_5) up to 2.4–2.6%, and potassium (K_2O) up to 2.1–2.3%. Deep detoxification of the substrate was proven using the biotesting method on a *Cucumis sativus* L. test culture. The critically high phytotoxicity of the raw manure (germination index of 35%, root inhibition at –45%) is completely neutralized when using a complex bioinoculant based on *Bacillus subtilis* and *Azotobacter chroococcum* strains, which increases the germination index to 95% and provides a root length increase of +22%. Final vermicomposting maximizes the germination index up to 97% and root growth up to +25%, confirming the complete transition of labile substances into stable humus complexes. The feasibility of industrial scaling of the developed technology on the basis of livestock complexes is substantiated. *Key words:* aerobic composting, cattle manure, bioinoculant, *Bacillus subtilis*, *Azotobacter chroococcum*, vermicompost, humic acids, phytotoxicity, germination index.

© Шевченко Н.О., Понікарчик С.В., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. Інтенсифікація промислового тваринництва призводить до утворення колосальних обсягів відходів, зокрема гною великої рогатої худоби (ВРХ), екологічно безпечна утилізація яких є однією з найгостріших проблем сучасного агросектору. Традиційне пасивне зберігання та неконтрольоване внесення сирого гною у ґрунт зумовлюють низку екологічних ризиків: значні втрати поживних речовин через вимивання, високу фітотоксичність субстрату внаслідок накопичення летких жирних кислот та аміаку, а також поширення патогенної мікрофлори й насіння бур'янів [1]. Крім того, анаеробні процеси у пасивних гноєсховищах є потужним джерелом емісії парникових газів (зокрема метану та закису азоту) і токсичних летких сполук, що суперечить глобальним вимогам декарбонізації та сталого розвитку.

Одним із найефективніших методів стабілізації таких відходів є аеробне компостування, проте класичний його варіант триває досить довго і часто супроводжується значними втратами азоту. Сучасна біотехнологія розглядає інтенсифікацію цього процесу шляхом спрямованого конструювання мікробних консорціумів. Використання спеціалізованих біоінокулянтів на основі термофільних целюлозолітичних бактерій, актиноміцетів та штамів-стимуляторів (таких як *Bacillus* та *Azotobacter*) дозволяє не лише прискорити деструкцію стійких органічних компонентів (соломи) та оптимізувати біотермічний режим для повної санації, а й мінімізувати газові втрати азоту за рахунок його біологічної іммобілізації [2]. Подальше поєднання аеробної стабілізації з вермікультивуванням відкриває нові можливості для глибокої гуміфікації матриці та отримання високоякісних екодобрив [3]. Проте механізми стадійного проходження температурних режимів, динаміка детоксикації та оптимізація газообміну за умов комплексного застосування новітніх біопрепаратів у технологіях прискореного компостування гною ВРХ все ще потребують системного експериментального обґрунтування.

Актуальність дослідження. Актуальність цієї роботи обумовлена необхідністю розв'язання гострої екологічної та економічної суперечності сучасного агропромислового комплексу. З одного боку, розвиток промислового тваринництва генерує багатотоннажні обсяги екологічно небезпечних відходів (гною ВРХ), які за традиційного пасивного зберігання стають потужним джерелом викидів парникових газів, забруднення ґрунтових вод та поширення патогенів. З іншого боку, сучасне рослинництво гостро потребує відновлення деградованих ґрунтів та переходу на засади органічного землеробства, що неможливо без внесення високоякісних, стабільних та безпечних органічних добрив.

У цьому контексті традиційні методи утилізації відходів тваринництва вже не відповідають жорстким міжнародним екологічним стандартам та вимогам декарбонізації аграрного сектору. Розробка та впровадження технологій прискореного біотермічного компостування із застосуванням спеціалізованих біоінокулянтів є одним із найбільш перспективних напрямів екологізації агропромислового комплексу. Проте більшість існуючих рішень мають серйозні недоліки: тривалий час дозрівання субстрату, неконтрольовані втрати азоту у вигляді аміаку та збереження залишкової фітотоксичності.

Експериментальне обґрунтування комплексного підходу, який поєднує керовану аеробну деструкцію за участю термофільних целюлозолітичних бактерій і актиноміцетів, використання штамів *Bacillus subtilis* + *Azotobacter chroococcum* та фінальну вермігуміфікацію, дозволяє радикально інтенсифікувати процес (до 21–24 діб). Це дослідження є вкрай актуальним, оскільки воно не лише вирішує проблему швидкої детоксикації та санації відходів, а й пропонує науково обґрунтовану модель збереження поживних речовин (азоту, фосфору, калію) і трансформації їх у високоцінні гумусові комплекси. Таким чином, робота безпосередньо спрямована на реалізацію принципів циркулярної економіки («відходи у доходи») та зниження вуглецевого сліду агропідприємств.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Висвітлені у статті результати є логічним підсумком наукових досліджень, проведених у межах комплексної тематики кафедри екології Уманського національного університету за темою: «Розробка методологічних підходів і практичного механізму екологічно-збалансованого природокористування» (державний реєстраційний номер 0108U009772).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика прискореної утилізації відходів тваринництва та підвищення якості органічних добрив перебуває в центрі уваги багатьох сучасних наукових шкіл, де дослідженню технологічних аспектів аеробного компостування та вермікультивації присвячено значну кількість фундаментальних праць. У вітчизняному науковому просторі вагомий внесок у вивчення процесів біоконверсії та оптимізації мікробіологічних параметрів переробки гною великої рогатої худоби внесли Скляр О.Г. [4, 5] та його колеги [6], які детально проаналізували енергоефективність різних систем аеробного компостування відходів тваринництва та довели економічну доцільність штучної аерації буртів. Водночас Нікітюк П.А. обґрунтував основи екологічної оцінки забруднення ґрунтів відходами тваринництва методом фітоіндикації, зосередившись на динаміці фітотоксичності для модельних тест-культур [7]. Наукові засади трансформації макроелементів та накопичення гумінових кислот під час сумісного компостування гною та рослинних решток відображені у сучасних наукових працях [8]. Логічним розвитком цих підходів є дослідження колективу авторів Ndiaye Issa та інші, які систематизували перспективні способи

прискореного компостування і вермікультивування у тваринницьких комплексах з метою побудови замкнутих циклів циркулярної агроекономіки [9]. Hussein G. Salih з колегами розкрив біотехнологічні механізми прискорення рециклінгу органічних відходів за допомогою внесення бактеріальних агентів, що стимулюють швидке проходження мезофільної фази [10]. Попри значну кількість фундаментальних напрацювань, питання комплексного поєднання біоінокуляції специфічними штамами та наступної вермістабілізації для оптимізації екологічних параметрів і зниження інтегральної фітотоксичності гною ВРХ залишається недостатньо висвітленим, що й обумовлює напрям нашого дослідження.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Попри наявність численних досліджень у сфері утилізації органічних відходів, поза увагою науковців залишається характер синергетичної взаємодії між штучно внесеними консорціумами термофільних мікроорганізмів та наступною трансформацією субстрату під впливом вермікультури. Досі не з'ясовано точні кількісні закономірності газообміну та кінетики фітотоксичності на проміжних етапах між завершенням термофільної фази аеробного компостування та початком біогуміфікації черв'яками. Наявний дефіцит системних даних щодо динаміки детоксикації та концентрування макроелементів за умов сумісного використання целюлозолітичних бактерій, актиноміцетів та штамів *Bacillus subtilis* + *Azotobacter chroococcum* обмежує можливості прогнозування якості кінцевого продукту, що заважає впровадженню таких інтегрованих технологій у промислових масштабах.

Новизна. Наукова новизна отриманих результатів полягає у комплексному експериментальному обґрунтуванні двоетапної системи біоконверсії гною ВРХ, яка поєднує кероване аеробне компостування з інокуляцією цільовими мікробіологічними консорціумами та фінальне вермікультивування. Уперше встановлено математичні кореляції між утриманням термофільного режиму (62–67 °C), рівнем аерації пористого простору субстрату (понад 10% O_2) та швидкістю трансформації лабільних фітотоксичних сполук у стабільні гумусові матриці. Новими є дані щодо динаміки ростових показників тест-культури *Cucumis sativus* L., які доводять, що саме поєднання специфічної мікробної інокуляції та вермістабілізації забезпечує максимальний індекс гермінації насіння (95–97%) і чотирикратне зниження фітотоксичності порівняно зі стандартними методами пасивної переробки.

Методологічне або загальнонаукове значення. Загальнонаукове значення роботи полягає у поглибленні теоретичних уявлень про закономірності штучно спрямованої мікробіологічної сукцесії та біохімічної деструкції висококонцентрованих полікомпонентних органічних відходів. У методологічному аспекті дослідження розширює методику екологічного моніторингу та біотестування закритих агробіосистем, пропонуючи інтегральний підхід до оцінки безпеки добрив через взаємозв'язок фізико-хімічних параметрів, динаміки емісії газів та експрес-оцінки фітотоксичності. Результати роботи формують надійну методологічну базу для розробки екологічно збалансованих технологій утилізації відходів тваринництва в межах концепції циркулярної економіки та систем управління вуглецевим слідом в аграрному секторі.

Викладення основного матеріалу. У ході експериментальних досліджень було комплексно оцінено ефективність технології прискореного аеробного компостування відходів тваринництва (гній великої рогатої худоби) з використанням біоінокулянтів на основі консорціумів термофільних целюлозолітичних бактерій та актиноміцетів. Головним критерієм екологічної безпеки та завершеності процесу біотермічної деструкції є стадійне проходження температурних режимів усередині буртів. Протягом перших трьох діб експерименту зафіксовано мезофільну фазу, під час якої інтенсивний розвиток первинної мікрофлори супроводжувався стрімким підняттям температури субстрату від початкових вісімнадцяти до сорока двох градусів Цельсія. Починаючи з четвертої доби, процес перейшов у термофільну фазу, а температура в ядрі бурту стабілізувалася в межах від шістдесяти двох до шістдесяти семи градусів Цельсія. Утримання цього режиму понад п'ять діб забезпечило повну санацію компостованої маси від патогенних ентеробактерій та життєздатного насіння бур'янів. До кінця третього тижня температура плавно знизилася до рівня навколишнього середовища, що вказує на уповільнення деструкції легкодоступної органіки та початок активних процесів гуміфікації. Загальний цикл дозрівання добрива склав 21–24 доби.

Важливим аспектом екологічної безпеки розробленої технології є мінімізація втрат сполук азоту та запобігання емісії токсичних газів в атмосферу. Регулювання початкового співвідношення вуглецю до азоту та впровадження періодичної механічної аерації дозволило оптимізувати життєдіяльність мікроорганізмів. Завдяки підтримці концентрації кисню в порах субстрату на рівні понад десять відсотків було повністю заблоковано розвиток анаеробних зон, що дозволило радикально знизити виділення летких сполук порівняно зі стандартним пасивним зберіганням відходів. Фізико-хімічні показники газового обміну та динаміка втрат поживних речовин чітко корелювали з інтенсивністю біотермічного процесу.

Для оцінки агрохімічної цінності та якісних трансформацій компостованої маси було проведено порівняльний аналіз вихідної сировини, готового аеробного компосту та продукту його подальшої біогуміфікації за участю вермікультури. Отримані результати підтвердили суттєву концентрацію

макроелементів у перерахованій на суху речовину масі, що відображено в таблиці 1.

Аналіз результатів, наведених у таблиці 1, свідчить про глибоку біохімічну трансформацію органічної матриці відходів під впливом аеробного компостування та наступного вермікультивування. У процесі переробки зафіксовано закономірне зниження вологості субстрату з початкових 68% до 42–45%, а також оптимізацію активної кислотності середовища (pH), яка зміщується від слабкокислої до нейтральної та слабколужної зони, що є сприятливим для більшості типів ґрунтів. Важливим індикатором завершеності процесу гуміфікації є динаміка вмісту органічної речовини, частка якої зменшується майже вдвічі за рахунок мінералізації легкодоступних вуглецевих сполук та виділення діоксиду вуглецю. Водночас спостерігається інтенсивне накопичення гумінових кислот, концентрація яких зростає з 2,1% у вихідній суміші до 8,4% у готовому компості та досягає максимуму у 12,6% у вермікомпості, що підтверджує високу гумусуючу здатність кінцевого продукту.

З екологічної та агрономічної точок зору визначальним результатом є істотне концентрування основних макроелементів у перерахунку на абсолютно суху речовину субстрату. Вміст загального азоту в ході аеробної деструкції збільшується з 1,6% до 2,8–3,1%, що зумовлено зменшенням загальної маси бурту та переведенням азоту мікрофлорою у стабільні білкові та гумусові структури, які мінімізують його вимивання. Аналогічна тенденція до зростання концентрації зафіксована для фосфору (збільшення вдвічі до 2,4–2,6%) та калію (зростання до 2,1–2,3%). Це доводить, що пропонована технологія не лише забезпечує екологічну безпеку через стабілізацію відходів, а й дозволяє отримати концентроване екологічно чисте органічне добриво з високим вмістом доступних для рослин елементів живлення.

Зміна якісного складу органічної матриці супроводжувалася суттєвим зниженням фітотоксичності, що визначали методом біотестування на модельній тест-культурі огірка посівного (*Cucumis sativus* L.). Екстракти з неперебродженого вихідного гною виявляли виражену інгібуючу дію на біооб'єкти через високу концентрацію залишків летких жирних кислот, фітотоксичних фенольних сполук та вільного аміаку. Натомість дозрілий аеробний компост продемонстрував не лише повну екологічну безпеку, а й виражений стимулюючий ефект щодо проростання насіння та інтенсифікації розвитку кореневої системи досліджуваних рослин, що деталізовано в таблиці 2.

Таблиця 1

Динаміка фізико-хімічних та агрохімічних показників субстрату на різних етапах біотехнологічної переробки відходів тваринництва

Показник	Вихідна суміш (гній та солома)	Готовий аеробний компост	Вермікомпост (кінцева гуміфікація)
Вологість, %	68,0±2,0	42,0±1,5	45,0±1,2
pH середовища	6,4±0,2	7,2±0,1	6,9±0,1
Органічна речовина, %	85,0±3,5	52,0±2,1	44,0±1,8
Загальний азот, % на суху речовину	1,6±0,2	2,8±0,15	3,1±0,1
Фосфор (P_2O), % на суху речовину	1,2±0,1	2,4±0,2	2,6±0,15
Калій (K_2O), % на суху речовину	1,4±0,2	2,1±0,1	2,3±0,2
Гумінові кислоти, %	2,1±0,3	8,4±0,5	12,6±0,7

Таблиця 2

Ростові показники та індекси фітотоксичності тест-культури огірка посівного (*Cucumis sativus* L.) залежно від технології переробки відходів

Технологічний варіант досліду	Індекс гермінації насіння, %	Приріст довжини коренів до контролю, %
Вихідний сирий гній	35,0 ± 3,0	−45,0 ± 4,0
Аеробний компост (без інокулянта)	78,0 ± 2,0	+5,0 ± 1,1
Аеробний компост із комплексним біоінокулянтом (*Bacillus subtilis* + *Azotobacter chroococcum*)	95,0 ± 1,5	+22,0 ± 1,5
Вермікомпостований субстрат	97,0 ± 1,0	+25,0 ± 1,2

Аналіз отриманих даних біотестування засвідчує глибоку детоксикацію субстрату в процесі біотермічного компостування. Головним критерієм оцінки безпеки виступав індекс гермінації – інтегральний показник фітотоксичності, який одночасно враховує як відсоток проростання насіння (схожість), так і інтенсивність початкового росту проростків (довжину їхніх коренів) порівняно з чистим контрольним середовищем (дистильованою водою). Значення індексу гермінації нижче 50% свідчить про високу токсичність субстрату, тоді як показники понад 80–90% вказують на екологічну стабільність і наявність стимулювального ефекту.

Вихідний сирий гній продемонстрував критично високу фітотоксичність для модельного об'єкта: індекс гермінації для *Cucumis sativus* становив лише 35,0±3,0%. При цьому спостерігалося жорстке пригнічення розвитку проростків, що виразилося в негативному прирості довжини коренів (–45,0±4,0%), що вказує на повну непридатність необроблених відходів для безпосереднього внесення у ґрунт через ризик пригнічення та хімічного опіку культурних рослин.

Впровадження технології аеробної стабілізації дозволило суттєво знизити негативний ефект, проте найбільш вагомі результати отримано за використання спеціалізованого комплексного біоінокулянта на основі штамів *Bacillus subtilis* та *Azotobacter chroococcum*. Завдяки активній ферментативній діяльності мікроорганізмів інокулянта, індекс гермінації насіння огірка зріс до 95,0±1,5%. Більше того, екстракти цього варіанта компосту забезпечили потужний біостимулюючий ефект, зумовивши інтенсивний приріст довжини коренів тест-об'єкта на +22,0±1,5%, що у понад 4 рази перевищує показники звичайного компосту без інокуляції (+5,0±1,1%).

Подальше поліпшення параметрів за вермікомпостування (індекс гермінації 97,0±1,0%, приріст довжини коренів +25,0±1,2%) підтверджує повний перехід лабільних сполук у стабільні гумусові комплекси. Сформована матриця компосту характеризується пролонгованою дією у ґрунті та високим вмістом фітогормонів мікробного походження, що доводить доцільність масштабування технології з використанням біоінокулянта *Bacillus subtilis* + *Azotobacter chroococcum* у промислових умовах тваринницьких комплексів.

Головні висновки. Розроблена технологія прискореного аеробного компостування гною ВРХ із використанням комплексного біоінокулянта (*Bacillus subtilis* + *Azotobacter chroococcum*) забезпечує повну санацію субстрату від патогенів за оптимальний цикл у 21–24 доби завдяки стабільному утриманню термофільного режиму. Завдяки підтримці рівня кисню понад 10% через механічну аерацію повністю заблоковано анаеробні зони, що радикально знизило емісію токсичних газів порівняно з пасивним зберіганням відходів. Біохімічна трансформація матриці призвела до зменшення вологості, оптимізації pH та дворазового концентрування макроелементів (азоту до 2,8–3,1%, фосфору до 2,4–2,6%, калію до 2,1–2,3%) на тлі потужного зростання вмісту гумінових кислот (до 8,4% у компості та 12,6% у вермікомпості). Біотестування на *Cucumis sativus* L. підтвердило повну детоксикацію субстрату: критична фітотоксичність сирого гною (індекс гермінації 35%) змінилася вираженим біостимулювальним ефектом інокульованого компосту та вермісубстрату, де індекс гермінації сягнув 95–97%, а приріст довжини коренів склав +22–25%.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати є готовим науково-практичним підґрунтям для проектування та масштабування автоматизованих ліній аеробного компостування на промислових тваринницьких комплексах, що дозволить швидко утилізувати багатотоннажні відходи та інтегрувати їх у замкнуті цикли циркулярної агроекономіки. Створення комерційних біоінокулянтів на основі досліджених штамів мікроорганізмів відкриває широкі можливості для ринку екологічно чистих добрив пролонгованої дії, затребуваних в органічному землеробстві. Крім того, масове впровадження цієї технології дозволить агропідприємствам радикально знизити емісію парникових газів (метану та аміаку), мінімізувати екологічні штрафні ризики та суттєво зменшити загальний вуглецевий слід сільськогосподарського виробництва.

Література

1. Yuchang Shi, Muhammad Fahad Sardar, Longmei Qiu, Binxu Li, Muhammad Zia-ur-Rehman, Yukun Xue, Xu Zhang, Wuyang Zhao, Hongna Li. Achieving high-quality and safe compost: a study on multi-optimization of a non-linear system using machine learning. *Bioresource Technology*, 2026. Volume 457. 135003. ISSN 0960-8524. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2026.135003.
2. Dongming Liu, Shuhan Wang, Liang Zhao, Wenbing Tan. Synergistic pathways of composting and hydrothermal carbonization for livestock manure valorization: From molecular mechanisms to carbon-neutral applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2026. Volume 14. Issue 2. https://doi.org/10.1016/j.jece.2026.121464
3. Jun Li, Mei Bai, Long Cheng, Yifan Shao, Yang Xu, Chao Xu, Xin Zhang, Hongliang Cao, Qiaoxia Yuan. Enhancing combined composting with cattle slurry solids as a bulking agent: Synergistic improvements in earthworm performance, lignocellulose degradation, and greenhouse gas mitigation. *Bioresource Technology*, 2026. Volume 450. 134465. ISSN 0960–8524. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2026.134465.
4. Скляр О.Г., Скляр Р.В. Дослідження способів утилізації відходів птахівництва і тваринництва. *Сучасні проблеми та технології аграрного сектору України: Зб. наукових-праць*, 2019. Вип. № 12. С. 298–304.

5. Скляр О. Г., Скляр Р. В., Комар, А. С. Шляхи підвищення якості виробництва біодобрив. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*, 2024. 14(2). https://doi.org/10.32782/2220-8674-2024-24-2-2
6. Войтов В.А. Аналіз технологій утилізації відходів птахівництва за кордоном. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*, 2019. Вип. 19. Т. 4. С. 100–109.
7. Никитюк П. Екологічна оцінка агрохімічної якості ґрунтів методом фітоіндикації. *Scientific Bulletin of UNFU*, 2021. 31. 57–61. https://doi.org/10.36930/40310608.
8. Larney Francis, Sullivan Dan, Buckley Katherine, Eghball Bahman. The role of composting in recycling manure nutrients. *Canadian Journal of Soil Science*, 2006. 86. 597–611. https://doi.org/10.4141/S05-116.
9. Ndiaye Issa, Baldé Amadou, Seydi Oumar, Tendeng Etienne, Sylla Elhadji, Diarra Karamoko. Impact of Composting and Vermicomposting of Three Types of Animal Manure on the Dynamics of Macronutrients Nitrogen, Phosphorus, and Potassium. *European Scientific Journal*, 2025. ESJ. 21. 65. https://doi.org/10.19044/esj.2025.v21n21p65.
10. Hussein G. Salih, Noori M. Cata Saady, Baiyu Zhang, Talib M. Albayati. The role of microbial inoculum in improving composting performance and promoting compost maturation: A review. *Green Technologies and Sustainability*, 2026. Volume 4. Issue 2. 100316. ISSN 2949-7361. https://doi.org/10.1016/j.grets.2025.100316.

Дата першого надходження статті до видання: 16.07.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

ЕКОЛОГІЯ ЗРОШУВАЛЬНИХ СИСТЕМ

УДК 626.81 : 504
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.30

ЕКОЛОГО-МЕЛІОРАТИВНИЙ МОНІТОРИНГ ЯКОСТІ ДРЕНАЖНО-СКИДНИХ ВОД НИЖНЬО-ДНІСТРОВСЬКОЇ ЗРОШУВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ КРАПЛИННОГО ЗРОШЕННЯ ЗА АГРОНОМІЧНИМИ КРИТЕРІЯМИ

Блажко А.П. (orcid.org/0000-0001-7951-8811)
Одеська державна академія будівництва та архітектури
вул. Дідріхсона, 4, 65029, м. Одеса
blazhko49@gmail.com

У статті висвітлено основні засади оцінки якості дренажно-скидних вод за агрономічними критеріями в зоні впливу Нижньо-Дністровської зрошувальної системи щодо можливості повторного використання їх для систем краплинного зрошення. Для дослідження обрано дренажні ділянки закритого горизонтального дренажу 1Гдр, 2Гдр, 4Гдр, С-1, С-2, та 10 Гдр, які розташовані на схилових землях Нижньо-Дністровської зрошувальної системи і знаходяться в землекористуванні Маяківської і Надлиманської територіальних громад Одеського району. Інформаційну базу наукової роботи складають дані моніторингових досліджень дренажно-скидних вод, які проводила Одеська гідрогеолого-меліоративна експедиція Держводагентства України впродовж 2016-2020 рр. Організація спостережень за якістю дренажних вод, а також перелік контрольованих гідрохімічних показників, відповідають нормативному документу «Порядок здійснення державного моніторингу поверхневих і дренажних вод». Використовуючи результати лабораторних аналізів в роботі виконано вибірку необхідних гідрохімічних інгредієнтів для проведення оцінки якості дренажних вод, проведено розрахунки концентрації токсичних солей та встановлено класи якості дренажних вод на основі існуючих нормативних документів. Дослідженням встановлено, що за небезпекою іригаційного засолення ґрунту дренажні води досліджуваних ділянок відносяться до III класу якості і не можуть бути використаними для краплинного зрошення. Розрахункові показники токсичних іонів, відображених у еквівалентах хлорид-іонів, в більшості досліджуваних проб дренажних вод перевищували нормовані величини (25,0 *мекв / дм*^{3}) в 1,6 – 2,8 рази. За небезпекою осолонцювання ґрунту дренажні води відповідають II класу якості. Поливи такою водою створюють небезпеку іригаційного засолення, підлуження, осолонцювання ґрунту, можуть справляти токсичний вплив зрошувальної води на рослини. За небезпекою підлуження ґрунту дренажні води відносяться до II класу якості і оцінені як «обмежено придатні» для систем краплинного зрошення. Воду такої якості можливо використовувати для мікрозрошення за умов постійного контролю її якості. *Ключові слова:* дренажні води, агрономічні показники якості води, токсичні солі, краплинне зрошення.

Ecological and reclamation monitoring of the quality of drainage and discharge waters from the Lower Dniester irrigation system for drip irrigation based on agronomic criteria. Blazhko A.

The article highlights the basic principles of assessing the quality of drainage and discharge waters according to agronomic criteria in the zone of influence of the Lower Dniester irrigation system regarding the possibility of their reuse for drip irrigation systems. The drainage areas of the closed horizontal drainage 1Gdr, 2Gdr, 4Gdr, C-1, C-2, and 10 Gdr, which are located on the sloping lands of the Lower Dniester irrigation system and are in the land use of the Mayakivska and Nadlymanska territorial communities of the Odessa region, were selected for the study. The information base of the scientific work is made up of data from monitoring studies of drainage and discharge waters, which were conducted by the Odesa Hydrogeological and Reclamation Expedition of the State Water Agency of Ukraine during 2016-2020. The organization of observations of the quality of drainage waters, as well as the list of controlled hydrochemical indicators, comply with the regulatory document «Procedure for State Monitoring of Surface and Drainage Waters». Based on laboratory analysis results, a set of hydrochemical parameters necessary for assessing drainage water quality was selected; calculations of toxic salt concentrations were performed; and drainage water quality classes were determined in accordance with existing regulatory standards. The study established that, regarding the risk of soil salinization due to irrigation, the drainage waters from the studied sites fall into quality class III and are unsuitable for drip irrigation. The calculated indicators of toxic ions, reflected in equivalents of chloride ions, in most of the studied samples of drainage waters exceeded the normalized values (25.0 meq/dm^3) by 1.6 – 2.8 times. In terms of the danger of soil salinization, drainage waters correspond to the II quality class. Irrigation with such water creates the danger of irrigation salinization, alkalization, soil salinization, and can have a toxic effect of irrigation water on plants. Due to the risk of soil alkalization, drainage waters belong to the II quality class and are assessed as “limitedly suitable” for drip irrigation systems. Water of this quality can be used for micro-irrigation under conditions of constant quality control. *Key words:* drainage water, agronomic indicators of water quality, toxic salts, drip irrigation.

© Блажко А.П., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. Крім базових нормативно-установчих документів, які направлені на підвищення ефективності використання зрошуваних земель, в Україні діють ряд законодавчих актів щодо розвитку гідротехнічних меліорацій та екологічно-безпечного використання водних ресурсів для поливу сільськогосподарських культур. На необхідність відновлення роботи існуючих дренажних систем, здатністю покращувати забезпечення ґрунтів вологою протягом всього вегетаційного періоду, наголошено в «Стратегії зрошення та дренажу в Україні на період до 2030 року» (далі Стратегія), схваленій розпорядженням Кабінету Міністрів України від 14.08.2019 р. № 688-р. [1]. Крім того, додатковими екологічними функціями щодо нормативів екологічно безпечного зрошення, осушення, управління поливами та водовідведенням в зоні зрошуваного землеробства, визначено постановою Кабінету Міністрів України від 02.09.2020 № 766 [2]. В зазначених нормативних документах наголошується, що основною задачею моніторингу ефективності горизонтального дренажу є оперативний контроль за показниками-індикаторами, які характеризують ефективність функціонування дренажу, вплив його на еколого-меліоративний та еколого-агромеліоративний стан зрошуваних ґрунтів і ландшафтів.

Актуальність дослідження. Обрана тема дослідження узгоджується з стратегічними напрямами державної політики у сучасному зрошувальному землеробстві України, особливо в умовах дефіциту водних ресурсів та потреби в енергозбереженні.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Тема наукової роботи відповідає основним напрямам Стратегії. Метою зазначеного документа є визначення стратегічних напрямів державної політики щодо зрошення та дренажу, забезпечення сталого екологічно збалансованого розвитку землеробства в Україні [1]. Одним з основних шляхів реалізації Стратегії є відновлення та збільшення площ зрошуваних земель, дренажних систем і (на тлі збереження та відтворення родючості ґрунтів) підтримка наукових досліджень у цьому напрямі.

Стратегією (завдання 8) передбачається відновлення дренажних систем у зоні зрошення. Заходи з модернізації на дійсних системах горизонтального дренажу в зоні зрошення мають здійснюватися лише на тих зрошувальних системах, у межах яких рівні ґрунтових вод залягають на критичних або близьких до них глибинах та є загроза підтоплення та вторинного засолення зрошуваних земель і ґрунтів. Зазначені вимоги також є актуальним для Нижньо-Дністровської зрошувальної системи (НДЗС), тому що значна частина дренажних ділянок закритого горизонтального дренажу на НДЗС не функціонує в проектному режимі або не працює зовсім. За належної якості дренажних вод дренажні системи мають доповнюватися додатковою функцією, а саме повторного використання води на зрошення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Більшість науковців розглядають дренажні води як додатковий водний ресурс для систем краплинного зрошення. Найбільш показовими за гостротою та професіональністю розуміння існуючої проблеми сучасного та перспективного використання підземних водних ресурсів, слід відмітити розробки науковців Херсонського державного аграрно-економічного університету (ХДАЕУ) спільно з фахівцями Інституту водних проблем і меліорації, які базуються на матеріалах польових досліджень на меліорованих землях Інгулецької зрошувальної системи.

Так, в науковій роботі [3] на основі багаторічного виробничого досвіду вченими ХДАЕУ для забезпечення задовільної якості поливної води в умовах Інгулецької зрошувальної системи підтверджено ефективність застосування щорічної «промивки» мінералізованих вод р. Інгулець шляхом збільшення обсягів попусків води задовільної якості із Карачунівського водосховища. Крім того, вчені вказують на неузгодженість нормативно-правових актів щодо оцінки якості зрошувальної води (між ДСТУ 2730:2015 і Постановою КМУ № 766), надають рекомендації щодо покращення якості поливних вод Інгулецької зрошувальної системи при щорічній розробці Регламенту промивки р. Інгулець.

Дослідження [4] присвячені розробкам теоретико-методологічним та технічним аспектам нового для водогосподарської галузі України питання розробки експертних систем моніторингу ефективності горизонтального дренажу (ЕСМЕГД) зрошуваних земель. Вченими сформульовані основні позиції щодо техніко-економічного обґрунтування необхідності ЕСМЕГД. Визначено перелік питань, які є обов'язковими під час створення та впровадження ЕСМЕГД. Запропоновано основні задачі, для вирішення яких повинна застосовуватись ЕСМЕГД, а також вимоги для формування бази даних та бази знань експертної системи моніторингу ефективності горизонтального дренажу.

Продовжуючи тему дослідження, автори наукових публікацій [5, 6] на прикладі Інгулецького зрошувального масиву розкривають сутність експертних системи (ЕС), які можуть виконувати функції експерта при вирішенні відповідних задач і проблемних ситуацій з використанням ЕОМ у соокупності з спеціальними дисциплінами (гідромеліорація, зрошуване землеробство, меліоративне ґрунтознавство, меліоративна гідрогеологія, геоінформатика, гідрохімія, агроекологія, економіка та ін.). В науковій роботі відзначається, що ЕС проводять аналіз, видають поради, консультації, рекомендації і, що слід обов`язково відмітити, також оцінюють ефект від впровадження, або збитки від не впровадження рекомендацій вчених. ЕС необхідні також при оцінці еколого-меліоративної та технічної ефективності функціонування дренажу.

Перспективним напрямом вдосконалення ЕС (на думку авторів вищезазначених наукових робіт) може бути розробка моделі формування хімічного складу дренажних вод, які на базі результатів багаторічних досліджень враховують тенденції, закономірності і прогнози його динаміки для відповідних природно-водогосподарських умов, в т. ч. і для мікрозрошення. Вченими доведено, що дренажний стік, за умови якісного гідрохімічного стану, можливо використовувати як додаткове джерело водних ресурсів на Інгулецькій зрошувальній системі.

В науковій роботі [7] за результатами польових досліджень на Обознівській ділянці Кропивницького родовища підземних вод Кропивницького району Кіровоградської області науковці Центральноукраїнського національного технічного університету виконали комплексне оцінювання якості підземних вод за показниками, котрі характеризують їх хімічний склад, загальноекологічну якість та фіто- токсичність, санітарно-токсикологічну та водно-міграційну здатність хімічних елементів. Проведеними дослідженнями встановлено, що за агрономічними, еколого-токсикологічними та технічними критеріями підземні води можуть бути придатними для систем краплинного зрошення без обмежень.

Окремі дослідження присвячені вивченню наукових і практичних засад щодо використання дренажно-скидних вод рисових зрошуваних систем, як додаткового джерела поливної води. Так, в відомих науково-практичних дослідженнях в галузі гідромеліорації та агроекології [8 – 10] науковці ХДАЕУ Морозов В.В., Морозов О.В., Дудченко К.В., Дудченко К.В., Корнбергер В.В. використовуючи польові сільськогосподарські і водогосподарські експерименти вивчали теоретико-методологічні і практичні засади регульованого використання дренажноскидних вод для зрошення рису та супутніх культур на Кілійській і Лісковській рисових системах Одеської області, а також в умовах Краснознам'янського масиву із забезпеченням ресурсо- та природозбереження.

В науковій публікації [11] вчені Національного університету водного господарства та природокористування Турченюк В.О., Кропивко С.М., Козішкурт С.М. вивчили питання щодо можливості повторного використання дренажно-скидних вод рисових зрошуваних систем на прикладі Придунайських рисових систем. За результатами дослідження запропонована технічна схема використання дренажно-скидних вод, яка передбачає їх розбавлення прісною дунайською водою в співвідношенні 1:1 або 1 : 2, що дає можливість економити водні та енергетичні ресурси, запобігати забрудненню водних джерел пестицидами.

Таким чином, огляд наукових розробок показав, що на сьогодні технічна та технологічна сторона застосування краплинного зрошення, як способу вологозабезпечення сільськогосподарських рослин, є досить вивченою.

Але, опубліковані матеріали щодо екологічного оцінювання якості дренажно-скидних вод для краплинного зрошення в зоні впливу Нижньо-Дністровської зрошувальної системи на теперішній час відсутні, що й обумовлює актуальність вибраної теми наукового дослідження.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується зазначена стаття. Низка невирішених питань щодо гідрохімічного моніторингу дренажно-скидних вод на НДЗС досі залишалася поза увагою дослідників. По-перше, не було вивчено їх гідрохімічний режим. По-друге, не проведено оцінку якості дренажно-скидних вод щодо можливості використання для поливу сільськогосподарських культур в умовах краплинного зрошення. По-третє, не встановлені можливі чинники деградації зрошуваних земель за умови організації поливів дренажно-скидними водами на ділянках краплинного зрошення.

Новизна. Вперше проведено прикладні дослідження щодо еколого-меліоративного оцінювання якості зворотних вод за агрономічними критеріями для встановлення можливості екологічно-безпечного мікрозрошення на землях НДЗС.

Методологічне або загальнонаукове значення. Для дослідження обрано дренажні ділянки закритого горизонтального дренажу 1Гдр, 2Гдр, 4Гдр, С-1, С-2, та 10 Гдр, які розташовані на схилових землях Нижньо-Дністровської зрошувальної системи і знаходяться в землекористуванні Маяківської і Надлиманської територіальних громад Одеського району. Інформаційну базу дослідження складають дані моніторингових досліджень дренажно-скидних вод Одеської гідрогеолого-меліоративної експедиції Держводагентства України впродовж 2016-2020 рр. [12]. Опрацювання статистичної інформації та результатів дослідження здійснювалось за допомогою пакетів програм Microsoft Excel.

Використовуючи результати лабораторних аналізів в роботі виконано вибірку необхідних гідрохімічних інгредієнтів для проведення оцінки якості дренажних вод, проведено розрахунки концентрації токсичних солей та встановлено класи якості дренажних вод на основі існуючих нормативних документів. Організація спостережень за якістю дренажних вод, а також перелік контрольованих гідрохімічних показників відповідають нормативному документу «Порядок здійснення державного моніторингу поверхневих і дренажних вод» [13].

Агрономічні критерії придатності води для краплинного зрошення встановлює ДСТУ 7591:2014 «Якість води для систем краплинного зрошення. Агрономічні, екологічні та технічні критерії» [14] згідно якого система оцінювання якості води для краплинного зрошення за агрономічними показниками включає критерії оцінки якості поливних вод за небезпекою іригаційного засолення, осолонцювання і підлуження ґрунтів з урахуванням буферних

властивостей ґрунтів. Під час оцінювання якості зрошувальної води виділяють три класи її придатності: І клас – придатна, ІІ клас – обмежено придатна, ІІІ – непридатна. Зрошувальна вода І класу – придатна для зрошення без обмежень. Зрошувальну воду ІІ класу використовують за умови обов`язкового застосування комплексу заходів запобігання деградації ґрунтів або поліпшення води до показників І класу. Зрошувальна вода ІІІ класу – вода, показники якої виходять за межі значень, що встановлені для зрошувальних вод ІІ класу, непридатна для зрошення без попереднього поліпшення її складу.

Викладення основного матеріалу. *Оцінювання якості дренажно-скидних вод за небезпекою іригаційного засолення ґрунту* здійснюють на основі показника токсичних іонів, відображених в еквівалентах хлорид-іонів (eCl^-), $мекв/дм^3$ за формулою [14, с. 6]:

$$eCl^{-токс.} = Cl^- + 0,2SO_4^{2-токс.} + 0,4HCO_3^{-токс.} + 10CO_3^{2-токс.}, \quad (1)$$

де $eCl^{-токс.}$ – сума токсичних солей в еквівалентах хлору, $мекв/дм^3$;

Cl^- – сума хлоридів, $мекв/дм^3$;

$SO_4^{2-токс.}$ – сума токсичних сульфатів, $мекв/дм^3$;

$HCO_3^{-токс.}$ – сума токсичних гідрокарбонатів, $мекв/дм^3$;

$CO_3^{2-токс.}$ – сума токсичних карбонатів, $мекв/дм^3$.

Результати розрахунків токсичних іонів в досліджуваних дренажних водах наведено в таблиці 1.

Аналіз табличного матеріалу показує, що дренажно-скидні води характеризуються підвищеним вмістом токсичних солей. У більшості досліджуваних проб концентрація токсичних іонів перевищувала гранично допустиме значення (25 мекв/дм³ для ІІІ класу якості води), яке встановлене ДСТУ 7591:2014 для важкосуглинкових і глинистих ґрунтів. За показником небезпеки вторинного засолення ґрунтів більшість досліджених вод належать до ІІІ класу якості, тобто є «непридатними» для краплинного зрошення. Використання таких вод без попереднього поліпшення їхньої якості може призвести до накопичення легкорозчинних солей у кореневмісному шарі ґрунту та погіршення його агрофізичних властивостей. Найбільш несприятливий екологічний стан дренажних вод спостерігався у 2017–2018 роках**,** коли на окремих дренажних ділянках концентрація токсичних солей досягала 74–78 мекв/дм³. На дренажній системі 10 Гдр виявлено позитивну тенденцію до зменшення концентрації токсичних солей протягом досліджуваного періоду – від 69 мекв/дм³ у 2016 році до 30 мекв/дм³ у 2020 році. Проте навіть за таких умов показники залишаються вищими за нормативні значення, що не дозволяє використовувати ці води для краплинного зрошення без додаткових заходів водопідготовки. Основний внесок у формування мінералізації дренажних вод здійснюють сульфат-іони**,** частка яких становить 37–87 % від загального солевмісту. Серед катіонів домінують іони натрію, вміст яких коливається в межах 27–55 %, що свідчить про значний ризик деградації ґрунтів при використанні цих вод для зрошення.

Оцінювання якості дренажних вод за небезпекою осолонцювання ґрунтів проведено шляхом співставлення фактичних величин відношення суми лужних катіонів натрію і калію (мекв/дм³) до суми всіх катіонів ($\frac{Na}{Na+Ca+Mg} \times 100\%$) до нормованих величин наведених у ДСТУ 7591:2014 «Якість води для систем краплинного зрошення» враховуючи гранулометричний склад ґрунтів та їхньої буферності щодо класу води за небезпекою засолення чи підлуження ґрунтів. Нормовані величини щодо частки вмісту катіонів натрію і магнію до суми всіх катіонів для

Таблиця 1

Оцінювання якості дренажно-скидних вод Нижньо-Дністровської зрошувальної системи за небезпекою вторинного засолення ґрунту для краплинного зрошення

Дренажна система	Показники	Концентрація токсичних іонів в еквівалентах хлору, $мекв/дм^3$				
		2016	2017	2018	2019	2020
С-1	$eCl^-_{сер}$	31	40	49	27	31
	Клас якості води	III	III	III	III	III
С-2	$e\,Cl^-_{сер}$	17	78	59	19	30
	Клас якості води	II	III	III	III	III
1 Гдр	$e\,Cl^-_{сер}$	18	74	74	41	29
	Клас якості води	II	III	III	III	III
2 -Гдр	$e\,Cl^-_{сер}$	17	54	35	33	73
	Клас якості води	II	III	III	III	III
10 Гдр	$e\,Cl^-_{сер}$	69	66	47	40	30
	Клас якості води	III	III	III	III	III
4 Гдр	$e\,Cl^-_{сер}$	46	50	49	33	31
	Клас якості води	III	III	III	III	III

ґрунтів глинистих низько- і середньо буферних становить від 30 до 50 % [14, с. 7]. Результати розрахунків середньовегетаційних величин відношення (у відсотках) суми лужних катіонів натрію і калію до суми всіх катіонів у дренажних водах наведено в таблиці 2.

Оцінка якості дренажної води за небезпекою осолонцювання ґрунту в разі її використання для поливу сільськогосподарських культур показала, що для важко суглинистих і глинистих, середньо- і високобуферних ґрунтів вода має ІІ клас якості, є «обмежено придатна» для організації краплинного зрошення. У цьому разі за дефіциту зрошувальної води слід розглядати можливість використання дренажних вод для поливів у змішуванні їх з дністровською водою і постійним проведенням агромеліоративних відновлювальних заходів.

Розрахунками встановлено, що частка лужних катіонів ($Na^+ + K^+$) у загальній сумі катіонів становила 34–50 %, що вказує на потенційний ризик натрієвої деградації ґрунтів. Показники осолонцювання мають відносно стабільний характер упродовж досліджуваного періоду**,** без різких міжрічних коливань, що свідчить про сталу присутність натрієво-калієвого компонента у хімічному складі дренажних вод.

Оцінювання якості дренажних вод за небезпекою підлуження ґрунту проводиться на основі комплексної оцінки не менше як за двома показниками [14]: pH, токсичної лужності ($HCO_3^- - CO_3^-$) й лужності від нормальних карбонатів (CO_3^-) . Звісно, що активність іонів водню (pH) є показником кислотності (pH < 7) або лужності (pH > 7) води. Нормальний діапазон pH в поливній воді становить від 6,5 до 8,4. При збільшені pH зрошувальної води вище 8,2 посилюється можливість осолонцювання ґрунту. Оцінювання якості поверхневих вод для СКЗ виконано шляхом співставлення фактичних даних гідрохімічних інгредієнтів з їх гранично допустимими величинами. За результатами екологічного оцінювання якості дренажних вод щодо небезпеки підлуження ґрунтів слід зазначити, що дренажні води досліджуваних систем стабільно належать до ІІ класу якості і є «обмежено придатними» для систем краплинного зрошування. Це значить, що поливна вода буде посилювати процеси підлуження ґрунтів, а надалі і підвищувати рівень їх осолонцювання, тому її можна використовувати тільки за умов постійного гідрохімічного контролю та обов'язкового застосування комплексу агромеліоративних заходів.

Головні висновки. Базуючись на визначеннях ДСТУ 7591:2014 результати дослідження свідчать, що впродовж 2016–2020 рр. дренажно-скидні води на силових землях Нижньо-Дністровської зрошувальної системи характеризувалися підвищеним вмістом токсичних солей, представлених переважно сульфатами та сполуками натрію. За критерієм небезпеки вторинного засолення більшість досліджених водних об'єктів віднесено до ІІІ класу якості, що свідчить про їх непридатність для безпосереднього використання у системах краплинного зрошення без попереднього поліпшення якості. Основним фактором, який обмежує можливість повторного використання дренажно-скидних вод для зрошення, є високий вміст сульфатів та натрію, що створює ризики розвитку деградаційних процесів у ґрунтах.

Таблиця 2

Оцінювання якості дренажно-скидних вод Нижньо-Дністровської зрошувальної системи за небезпекою осолонцювання ґрунту для краплинного зрошення

Дренажна ділянка	Показники	Іригаційна оцінка якості дренажних вод за небезпекою осолонцювання				
		2016	2017	2018	2019	2020
С-1	$\frac{Na}{Ca+Mg+Na}\times 100\%$		48	41	44	50
	Клас якості води	II	II	II	II	II
С-2	$\frac{Na}{Ca+Mg+Na}\times 100\%$		44	44	44	48
	Клас якості води	II	II	II	II	II
1 Гдр	$\frac{Na}{Ca+Mg+Na}\times 100\%$		44	43	36	49
	Клас якості води	II	II	II	II	II
2 -Гдр	$\frac{Na}{Ca+Mg+Na}\times 100\%$		42	37	34	40
	Клас якості води	II	II	II	II	II
10 Гдр	$\frac{Na}{Ca+Mg+Na}\times 100\%$		43	42	43	44
	Клас якості води	II	II	II	II	II
4 Гдр	$\frac{Na}{Ca+Mg+Na}\times 100\%$	46	43	42	43	44
	Клас якості води	II	II	II	II	II

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

За показниками небезпеки підлуження та осолонцювання ґрунтів досліджувані дренажні води переважно належать до II класу якості та можуть використовуватися для краплинного зрошення лише за умови постійного моніторингу і застосування комплексу агромеліоративних заходів:

– поліпшення якості води і корегування режимів зрошення;

– внесення кальцієвмісних меліорантів (гіпс, фосфогіпс, дроблений вапняк, дефекат) та нормативних доз органічних добрив;

– уведення у сівозміни багаторічних трав та сидератів.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати досліджень можуть бути використані для розробки комплексу заходів щодо відновлення дренажних систем на схилових землях НДЗС та доповнення їх функцією повторного використання води на зрошення (згідно зі Стратегією).

Перспективним напрямом подальших досліджень є оцінювання можливості змішування дренажно-скидних вод на схилових землях НДЗС із дністровською водою, визначення оптимальних пропорцій змішування та розроблення ресурсозберігаючих технологій повторного використання дренажного стоку в системах краплинного зрошення.

Наступним етапом дослідження має стати екологічне оцінювання якості дренажно-скидних вод на зрошуваних землях II-ої черги Нижньо-Дністровської зрошувальної системи для встановлення можливості їх використання на ділянках краплинного зрошення.

Література

1. Про схвалення Стратегії зрошення та дренажу в Україні на період до 2030 року: розпорядження Кабінету Міністрів України від 14.08.2019 р. № 688-р. Верховна Рада України. Законодавство України. URL : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/688-2019-%D1%80#Text (дата звернення: 2.06.2026).
2. Про нормативи екологічно безпечного зрошення, осушення, управління поливами та водовідведенням : постанова Кабінету Міністрів України від 02.09.2020 № 766. Верховна Рада України. Законодавство України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/766-2020-%D0%BF#Text (дата звернення: 02.06.2026).
3. Морозов О.В., Морозов В.В., Кабаченко А.І., Біднина І.О. Оцінка якості зрошувальної води в системі еколого-меліоративного моніторингу. *Водні біоресурси та аквакультура.* 2020. № 2(8). С. 192-209. URL: www.wra-journal.ksauniv.ks.ua (дата звернення: 02. 06. 2026).
4. Морозов О.В. Іванів М.О. Морозов В.В. Козленко Є.В. Теоретико-методологічні засади формування експертних систем ефективності зрошення і горизонтального дренажу. *Таврійський науковий вісник. Серія: технічні науки.* 2021. № 3. С. 106-115. DOI https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2021.3.13.
5. Козленко Є.В., Морозов О.В., Морозов В.В. Динаміка якості дренажних вод в експертній системі еколого-агромеліоративного моніторингу зрошуваних земель (на прикладі Інгулецького масиву). *Таврійський науковий вісник* № 116. Частина 1. 2020. С. 173 – 182. DOI https://doi.org/10.32851/2226-0099.2020.116.1.24.
6. Козленко Є.В., Морозов О.В. Морозов В.В. Дренажний стік як додаткове джерело водних ресурсів на Інгулецькій зрошувальній системі *Аграрні інновації.* 2021. № 5. С. 52–59. URL: https://agrarian-innovations.izpr.ks.ua/index.php/agrarian/issue/view/5/5 (дата звернення: 12.06.2026).
7. Ковальов М.М., Звєздун О.М., Михайлова Д.М. Агроекологічна оцінка якості підземних вод для систем мікрозрошення в умовах Північного Степу України. *Водні біоресурси та аквакультура*. № 1. 2020. С. 16 – 23. DOI https://doi.org/10.32851/wba.2020.1.2.
8. Рисові зрошувальні системи: використання дренажно-скидних вод : монографія / В. В. Дудченко, В. Г. Корнбергер, В. В. Морозов, О. В. Морозов, К. В. Дудченко. Херсон : ФОП Грінь Д. С., 2016. 212 с.
9. Морозов В. В., Корнбергер В. Г., Дудченко К. В., Морозов О.В. Перспективи використання дренажно-скидних вод рисових зрошувальних систем в умовах Краснознам'янського масиву. *Зрошуване землеробство.* 2013. № 60. С. 60 – 62. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Zz_2013_60_25 (дата звернення: 04. 06. 2026).
10. Морозов В.В., Морозов О.В., Дудченко К.В., Корнбергер В.В. Ресурсозберігаюче використання дренажно-скидних вод рисових зрошувальних систем. *Таврійський науковий вісник. Сер. Меліорація і родючість ґрунтів. 2020*. № 92. С. 165 – 175. https://www.tnv-agro.ksauniv.ks.ua/archives/92_2015/31.pdf (дата звернення: 11. 06. 2026).
11. Турченюк В.О., Кропивко С.М., Козішкурт С.М. Використання дренажно-скидних вод – складова екологічно-безпечної технології виробництва рису. *Вісник НУВГП Сер. Технічні науки*. № 3(83) 2018 р. С. 3 – 12. URL: https://doi.org/10.31713/vt320181 (дата звернення: 2.06.2026).
12. Еколого-меліоративний моніторинг дренажних систем на зрошуваних землях Нижньо-Дністровської зрошувальної системи. Архів Одеської гідрогеолого-меліоративної експедиції. 1991 – 2020 рр.
13. Про затвердження Порядку здійснення державного моніторингу вод. Постанова КМУ від 19. 09. 2018 р. № 758 з останніми змінами внесеними Постановою КМУ від 24.12.2025 р. № 1731 URL : https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=78585 (дата звернення: 02. 06. 2026).
14. ДСТУ 7591 : 2014. Зрошення. Якість води для систем краплинного зрошення. Агрономічні, екологічні та технічні критерії. [чинний від 2015-07-01]. Київ, 2015. 15 с. (Інформація та документація).

Дата першого надходження статті до видання: 16.07.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

ЕКОЛОГІЯ ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМ

УДК 504.06:630
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.31

ЕКОЛОГІЧНА СТІЙКІСТЬ ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМ ЖИТОМИРСЬКОГО ПОЛІССЯ (НА ПРИКЛАДІ ДП «ОЛЕВСЬКИЙ ЛІСГОСП АПК») В УМОВАХ СУЧАСНИХ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН

Вишневський А.В. (orcid.org/0000-0001-5381-1219),
Піціль А.О. (orcid.org/0000-0002-0962-574X),
Грищенко Д.С. (orcid.org/0009-0009-4499-1321),
Коморна О.М. (orcid.org/0000-0003-1498-0719)
Поліський національний університет
Старий бульв., 7, 10002, Житомир
pitsil.uk@gmail.com

У статті наведено результати комплексної екологічної оцінки стійкості лісових екосистем Житомирського Полісся в умовах сучасних кліматичних змін на прикладі лісових насаджень ДП «Олевський лісгосп АПК». Дослідження виконано на основі матеріалів 12 постійних пробних площ, закладених у деревостанах різного породного складу та типів лісорослинних умов. Використано маршрутно-експедиційний, лісопатологічний, таксаційний, геоботанічний, картографічний і статистичний методи досліджень.

Встановлено, що середній індекс санітарного стану досліджених насаджень становив 1,47, що характеризує їх як переважно екологічно стійкі із локальними проявами деградаційних процесів. Частка здорових дерев становила 67,2 %, ослаблених – 22,1 %, сильно ослаблених – 7,6 %, сухостійних – 3,1 %. Найнижчий рівень екологічної стійкості встановлено у соснових насадженнях (Іс = 1,68), тоді як березові (Іс = 1,23) та мішані деревостани (Іс = 1,38) характеризувалися кращим екологічним станом. Серед типів лісорослинних умов найвищу стійкість виявлено у вологих суборах (Іс = 1,28), тоді як у свіжих і вологих дубово-соснових суборах значення індексу становили відповідно 1,52 та 1,51.

Визначено, що основними чинниками зниження екологічної стійкості лісових екосистем є кліматично зумовлене ослаблення деревостанів (35 %), біотичні пошкодження (30 %), наслідки лісових пожеж (20 %), порушення гідрологічного режиму (10 %) та інші фактори (5 %).

Обґрунтовано можливість використання показників санітарного стану як інтегральних індикаторів екологічної стійкості лісових екосистем. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення системи екологічного моніторингу, прогнозування деградаційних процесів і розроблення адаптаційних природоохоронних заходів щодо підвищення стійкості лісів Житомирського Полісся в умовах сучасних кліматичних змін. *Ключові слова:* лісові екосистеми; екологічна стійкість; кліматичні зміни; санітарний стан насаджень; Житомирське Полісся; лісопатологічний моніторинг; біотичні фактори; екологічні ризики; адаптація лісових екосистем.

Ecological resilience of forest ecosystems in Zhytomyr Polissya under contemporary climate change: a case study of the State Enterprise «Olevsk Forestry APC». Vyshnevskyi A., Pitsil A., Hryshchenko D., Komorna O.

The article presents the results of a comprehensive ecological assessment of the stability of forest ecosystems in Zhytomyr Polissia under current climate change using the forests of the State Enterprise «Olevsk Forestry APC» as a case study. The research was based on field investigations conducted at 12 permanent sample plots established in pine, birch and mixed forest stands representing different forest site conditions. Route surveys, forest pathological assessment, forest inventory, geobotanical, cartographic and statistical methods were applied.

The obtained results indicate that the average sanitary condition index of the investigated stands was 1.47, reflecting a generally satisfactory ecological condition with local manifestations of degradation processes. Healthy trees accounted for 67.2% of the total stand composition, weakened trees for 22.1%, severely weakened trees for 7.6%, and dead standing trees for 3.1%. The lowest ecological stability was recorded in pine stands (S_I = 1.68), whereas birch (S_I = 1.23) and mixed stands (S_I = 1.38) demonstrated higher resistance to adverse environmental conditions. Among forest site types, the highest stability was observed in moist subor sites (S_I = 1.28), while fresh and moist oak–pine subor sites were characterized by sanitary indices of 1.52 and 1.51, respectively.

The study identified climate-induced tree weakening (35%), biotic damage (30%), forest fires (20%), alterations in the hydrological regime (10%), and other factors (5%) as the principal drivers reducing the ecological stability of forest ecosystems.

The results demonstrate that the sanitary condition index can be considered an integrated indicator of forest ecosystem ecological stability. The findings may be applied to improve ecological monitoring systems, predict degradation processes, and develop adaptive forest management measures aimed at increasing the resilience of forest ecosystems in Zhytomyr Polissia under current climate change. *Key words:* forest ecosystems; ecological stability; climate change; sanitary condition index; Zhytomyr Polissia; forest pathology monitoring; biotic factors; ecological risks; adaptive forest management.

© Вишневський А.В., Піціль А.О., Грищенко Д.С., Коморна О.М., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. Лісові екосистеми Українського Полісся є одним із ключових компонентів природного середовища, оскільки забезпечують підтримання біорізноманіття, регулювання водного режиму, депонування вуглецю, захист ґрунтів та стабілізацію кліматичних умов. Водночас упродовж останніх десятиліть їх функціонування дедалі більше визначається впливом сучасних кліматичних змін, які супроводжуються підвищенням температури повітря, збільшенням тривалості посушливих періодів, порушенням гідрологічного режиму та зростанням частоти екстремальних природних явищ. Сукупна дія цих факторів знижує адаптаційний потенціал деревостанів, погіршує їх санітарний стан та сприяє активізації біотичних агентів деградації.

Особливої актуальності зазначені процеси набувають для лісових екосистем Житомирського Полісся, де переважають соснові насадження, сформовані на дерново-підзолистих піщаних і супіщаних ґрунтах із низькою вологоутримувальною здатністю. За таких природних умов навіть відносно незначні зміни температурного та водного режимів можуть спричиняти фізіологічне ослаблення дерев, підвищення їх сприйнятливості до стовбурових шкідників і патогенних організмів, а також зниження екологічної стійкості лісових екосистем загалом.

ДП «Олевський лісгосп АПК» є репрезентативним об'єктом для дослідження цих процесів, оскільки лісові насадження займають 29 796,0 га, або 85,8 % площі земель лісового фонду підприємства, а переважаючими є деревостани типу В3ДС, площа яких становить 13 296,5 га (44,0 %). Пробні площі закладалися у межах ділянок площею від 0,4 га до 40,0 га. Вік насаджень на дослідних ділянках змінювався від 12 років у молодняках до 103 років у старших соснових деревостанах. Це дало можливість охопити молоді, середньовікові, пристигаючі, стиглі та перестійні насадження.

Основними типами лісорослинних умов, у яких закладалися пробні площі, були В2ДС, В3ДС і В4ДС. Найбільше значення для теми дослідження мали вологі дубово-соснові субори В3ДС, оскільки саме вони найчастіше поєднують високу участь сосни, нестабільний водний режим, ризик ослаблення деревостанів і поширення верхівкового короїда.

До складу пробних площ були включені ділянки з рідкісними та індикаторними видами флори: рододендроном жовтим, смілкою литовською, росичкою середньою, плауном колючим. Наявність цих видів дала змогу оцінити не лише санітарний стан деревостанів, а й екологічну цінність дослідних ділянок.

У сучасних умовах оцінювання стану лісів не може обмежуватися лише характеристикою санітарного стану окремих насаджень. Необхідним є комплексний екологічний підхід, який дозволяє розглядати санітарний стан як інтегральний індикатор стійкості лісових екосистем, що відображає їх реакцію на сукупну дію природних і антропогенних факторів. Такий підхід створює наукове підґрунтя для вдосконалення системи екологічного моніторингу, прогнозування деградаційних процесів та розроблення адаптаційних заходів щодо підвищення стійкості лісів в умовах сучасних кліматичних змін.

Актуальність дослідження. У сучасних умовах глобальних кліматичних змін забезпечення екологічної стійкості лісових екосистем є одним із пріоритетних завдань екології, лісового господарства та природокористування [1–5]. Підвищення середньорічної температури повітря, збільшення тривалості посушливих періодів, порушення гідрологічного режиму та активізація біотичних чинників істотно змінюють умови функціонування лісових екосистем, спричиняючи ослаблення деревостанів, погіршення їх санітарного стану, зниження біологічної продуктивності та здатності виконувати важливі екосистемні функції [1–5].

Особливої актуальності зазначені процеси набувають для лісів Українського Полісся, де переважають соснові насадження, сформовані на дерново-підзолистих піщаних і супіщаних ґрунтах із низькою вологоутримувальною здатністю, що підвищує їх чутливість до кліматичного стресу, дефіциту вологи та розвитку біотичних пошкоджень [6–10]. За таких умов своєчасне виявлення закономірностей зміни екологічної стійкості деревостанів є важливою передумовою ефективного ведення лісового господарства, збереження біорізноманіття, підтримання кліматорегулюючих, водоохоронних і ґрунтозахисних функцій лісів [2–5, 11, 12].

Незважаючи на значну кількість наукових праць, присвячених впливу окремих кліматичних, едафічних або біотичних чинників на стан лісових насаджень, недостатньо дослідженими залишаються питання їх комплексної взаємодії та впливу на екологічну стійкість лісових екосистем з урахуванням типів лісорослинних умов, породного складу та санітарного стану деревостанів [7–12]. Це обумовлює необхідність проведення комплексної екологічної оцінки стійкості лісових екосистем як наукової основи для вдосконалення системи екологічного моніторингу, прогнозування розвитку деградаційних процесів та розроблення адаптаційних заходів щодо підвищення стійкості лісів в умовах сучасних кліматичних змін [1, 4, 11–13].

Метою дослідження є комплексна екологічна оцінка стійкості лісових екосистем Житомирського Полісся в умовах сучасних кліматичних змін та обґрунтування заходів щодо підвищення їх екологічної стійкості.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження виконано в межах науково-дослідної роботи Поліського національного університету «Вплив еколого-кліматичних чинників на стан лісових екосистем ДП «Олевський лісгосп АПК», що

проводилася відповідно до договору, укладеного між ДП «Олевський лісгосп АПК» та Поліським національним університетом.

Результати дослідження спрямовані на вирішення актуальних наукових і практичних завдань щодо оцінювання впливу еколого-кліматичних та біотичних чинників на екологічну стійкість лісових екосистем Українського Полісся, удосконалення системи екологічного моніторингу, підвищення ефективності лісопатологічного контролю та наукового обґрунтування адаптаційних заходів із забезпечення стійкого функціонування лісових екосистем в умовах сучасних кліматичних змін.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема оцінювання екологічної стійкості лісових екосистем в умовах сучасних кліматичних змін є одним із провідних напрямів сучасних екологічних і лісівничих досліджень. У численних міжнародних роботах встановлено, що підвищення температури повітря, зміна режиму атмосферних опадів, збільшення частоти посух, пожеж та біотичних пошкоджень істотно впливають на продуктивність, санітарний стан, біорізноманіття та екосистемні функції лісів, знижуючи їх адаптаційний потенціал і стійкість до природних та антропогенних навантажень [1–5]. Сучасні оглядові дослідження також підкреслюють необхідність комплексного аналізу взаємодії кліматичних, біотичних та антропогенних чинників при оцінюванні функціонування лісових екосистем.

Значний внесок у дослідження впливу кліматичних змін на ліси України зробили А. Й. Швиденко, І. Ф. Букша, С. В. Краковська, які обґрунтували основні тенденції трансформації лісових екосистем під впливом глобального потепління та визначили пріоритетні напрями їх адаптації. Особливості деградації соснових насаджень Українського Полісся, роль посух, порушення водного режиму та біотичних чинників у розвитку процесів всихання висвітлено у працях А. І. Гетьманчука, О. В. Кичилюка, В. П. Войтюка, О. Ю. Андреєвої, В. Л. Мєшкової, А. Ф. Гойчука та інших учених [6–12].

Водночас аналіз наукових публікацій свідчить, що більшість досліджень присвячена окремим аспектам функціонування лісових екосистем – впливу кліматичних змін, поширенню стовбурових шкідників, пожежній небезпеці або санітарному стану деревостанів. Недостатньо вивченими залишаються питання комплексної екологічної оцінки стійкості лісових екосистем із урахуванням одночасного впливу еколого-кліматичних, біотичних та лісотипологічних чинників, особливо для лісів Житомирського Полісся. Саме необхідність інтегрального оцінювання екологічної стійкості деревостанів та обґрунтування адаптаційних заходів визначає актуальність і наукову новизну проведеного дослідження.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття та новизна досліджень. Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених впливу кліматичних змін на лісові екосистеми, недостатньо вивченими залишаються питання комплексної екологічної оцінки їх стійкості з урахуванням санітарного стану деревостанів, типів лісорослинних умов, породного складу та сукупного впливу еколого-кліматичних і біотичних чинників, особливо для лісів Житомирського Полісся [4, 6–12].

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що запропоновано комплексний підхід до оцінювання екологічної стійкості лісових екосистем ДП «Олевський лісгосп АПК» та проведено їх комплексне оцінювання на основі інтегрованого аналізу. Встановлено особливості формування екологічної стійкості соснових, березових та мішаних деревостанів, визначено відмінності їх санітарного стану залежно від типу лісорослинних умов, а також обґрунтовано використання індексу санітарного стану як інтегрального показника оцінювання екологічної стійкості лісових екосистем. Отримані результати стали науковою основою для розроблення комплексу адаптаційних заходів, спрямованих на підвищення стійкості лісових екосистем в умовах сучасних кліматичних змін.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічне значення дослідження полягає у застосуванні комплексного підходу до оцінювання екологічної стійкості лісових екосистем, що поєднує аналіз матеріалів лісовпорядкування, польові дослідження на пробних площах, визначення санітарного стану деревостанів, оцінку типів лісорослинних умов та аналіз впливу еколого-кліматичних і біотичних чинників. Такий підхід може бути використаний під час екологічного моніторингу лісових екосистем, оцінювання їх сучасного стану та наукового обґрунтування заходів із підвищення екологічної стійкості насаджень.

Індекс санітарного стану [14] деревостану розраховували як середньозважене значення категорій стану дерев з урахуванням кількості дерев кожної категорії. Інтерпретацію одержаних значень здійснювали відповідно до прийнятої шкали санітарного стану насаджень. У роботі індекс санітарного стану розглядається як інтегральний індикатор екологічної стійкості деревостанів, оскільки відображає сукупну реакцію лісових екосистем на дію кліматичних, біотичних та антропогенних чинників.

Статистичну обробку результатів виконували із використанням програмного забезпечення Microsoft Excel 2021. Для кожної вибірки визначали середнє арифметичне (M) та стандартне відхилення (SD). Частку впливу основних чинників визначали методом експертного оцінювання за результатами польових обстежень і аналізу матеріалів лісовпорядкування.

Виклад основного матеріалу. Дослідження виконувалися на території ДП «Олевський лісгосп АПК», розташованого у північно-західній частині

Житомирської області в межах Українського Полісся. Територія підприємства характеризується переважанням рівнинного рельєфу, дерново-підзолистих піщаних і супіщаних ґрунтів, значною часткою заболочених земель та високою залежністю функціонування лісових екосистем від гідрологічного режиму. Загальна площа земель лісового фонду становить 34 739,0 га, із яких 29 796,0 га (85,8 %) вкриті лісовою рослинністю. До складу підприємства входять чотири лісництва – Копищанське, Сущанське, Корощинське та Кишинське, які репрезентують основні типи лісових екосистем Житомирського Полісся.

Типологічний аналіз лісового фонду показав, що найбільшу площу займають деревостани типу В3ДС, на які припадає 13 296,5 га, або 44,0 % вкритих лісовою рослинністю земель. Значне поширення також мають типи В2ДС та В4ДС, які формують основну структуру соснових і мішаних лісів підприємства. Домінування соснових насаджень у поєднанні з легкими за механічним складом ґрунтами визначає підвищену чутливість екосистем до дефіциту ґрунтової вологи, кліматичних коливань та біотичних пошкоджень.

Комплексна оцінка екологічного стану лісових екосистем проводилася на основі матеріалів лісовпорядкування та результатів польових досліджень (табл. 1), виконаних на 12 пробних площах, закладених у різних типах лісорослинних умов.

Під час обстежень визначали категорії життєвого стану дерев, розраховували індекс санітарного стану деревостанів, аналізували породний склад насаджень та оцінювали вплив природних і антропогенних чинників на їх екологічну стійкість. Отримані результати дали можливість здійснити комплексне оцінювання сучасного стану лісових екосистем підприємства та встановити основні закономірності їх функціонування в умовах сучасних кліматичних змін.

Результати польових досліджень свідчать, що загальний санітарний стан досліджених деревостанів є задовільним, однак характеризується наявністю локальних осередків ослаблення. У середньому частка здорових дерев становила 67,2 %, ослаблених – 22,1 %, сильно ослаблених – 7,6 %, а сухостійних – 3,1 %. Середній індекс санітарного стану деревостанів дорівнював 1,47, що відповідає задовільному рівню екологічної стійкості насаджень.

Аналіз даних, наведених у таблиці 1, свідчить про суттєву варіабельність санітарного стану дослідних деревостанів. Найнижчі значення індексу санітарного стану зафіксовано на ПП7 (Іс = 1,16) та ПП11 (Іс = 1,21), що характеризує ці насадження як найбільш стійкі. Натомість найвищі значення індексу встановлено на ПП9 (Іс = 1,93) та ПП6 (Іс = 1,88), де спостерігаються найбільш виражені процеси ослаблення деревостанів.

Разом із тим у частині соснових деревостанів зафіксовано підвищення індексу санітарного стану, що свідчить про розвиток процесів ослаблення під впливом несприятливих екологічних факторів.

Встановлено, що характер лісорослинних умов істотно впливає на санітарний стан насаджень (рис. 2). Найбільш сприятливими виявилися умови типу В4ДС, у яких середній індекс санітарного стану становив 1,28. У типах В2ДС та В3ДС значення цього показника було вищим і становило відповідно

Таблиця 1

Характеристика пробних площ

№ ПП	Переважаюча порода	Вік, років	Здорові дерева, %	Ослаблені дерева, %	Сильно ослаблені дерева, %	Сухостій, %	Індекс санітарного стану (Іс)
ПП1	Сосна	74	58	28	10	4	1,60
ПП2	Сосна	34	76	18	4	2	1,32
ПП3	Береза	64	82	14	3	1	1,23
ПП4	Береза, дуб, вільха	99	54	30	11	5	1,67
ПП5	Береза, вільха, дуб	69	73	20	5	2	1,36
ПП6	Сосна	74	42	35	16	7	1,88
ПП7	Сосна, береза	18	88	9	2	1	1,16
ПП8	Сосна, береза	54	68	23	7	2	1,43
ПП9	Сосна	103	39	36	18	7	1,93
ПП10*	Сосново-дубове угруповання	–	70	21	6	3	1,42
ПП11*	Березово-соснове угруповання	–	84	12	3	1	1,21
ПП12*	Сосново-березове угруповання	–	72	19	6	3	1,40

**Для ПП10–ПП12 вік деревостану не зазначено у зв'язку з різновіковою структурою досліджених угруповань.*

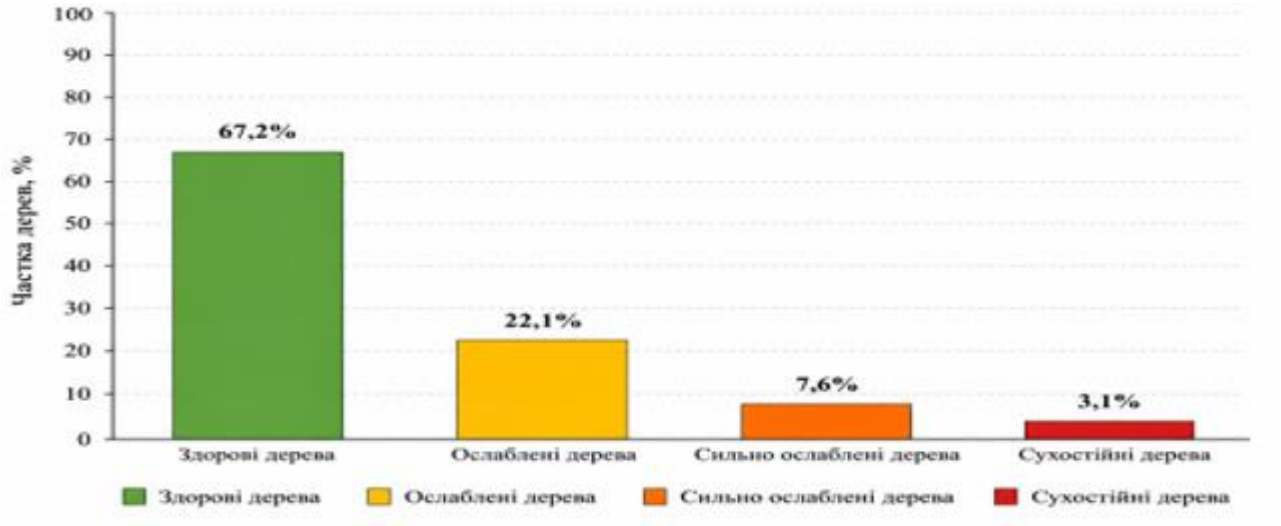


Рис. 1. Структура дерев за категоріями життєвого стану на пробних площах

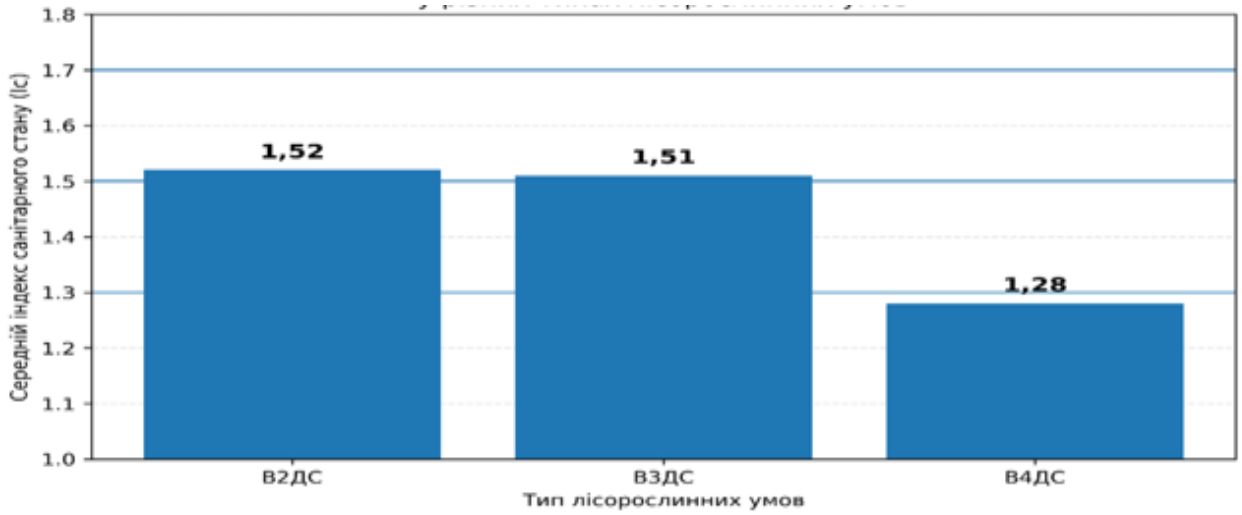


Рис. 2. Середній індекс санітарного стану деревостанів у різних типах лісорослинних умов

1,52 та 1,51, що свідчить про більшу екологічну вразливість деревостанів цих типів. Отримані результати підтверджують важливу роль лісорослинних умов у формуванні стійкості лісових екосистем та визначенні їх реакції на сучасні кліматичні зміни.

Порівняльний аналіз деревостанів різного породного складу показав, що найменшою стійкістю характеризуються соснові насадження, середній індекс санітарного стану яких становив 1,68. Березові деревостани мали найкращий санітарний стан (1,23), тоді як мішані насадження характеризувалися проміжним значенням (1,38). Вища екологічна стійкість мішаних деревостанів порівняно з чистими сосновими пояснюється більшою структурною різноманітністю, кращою адаптацією до змін умов середовища та нижчим рівнем поширення спеціалізованих стовбурових шкідників.

Для оцінки структури життєвого стану дерев у різних умовах місцезростання побудовано узагальнену діаграму співвідношення основних категорій дерев.

Аналіз структури показує, що зі збільшенням зволоження від B2ДС до B4ДС зростає частка здорових дерев та одночасно зменшується кількість сильно ослаблених і сухостійних екземплярів. Найбільш виразно ця тенденція проявляється в соснових насадженнях старших вікових груп, для яких водний режим є одним із ключових факторів підтримання життєздатності. Це свідчить про позитивний вплив покращення водозабезпечення на підтримання життєздатності деревостанів.

Важливим етапом дослідження було визначення особливостей реакції деревостанів різного породного складу на вплив несприятливих еколого-кліматичних умов. Для цього було проаналізовано

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

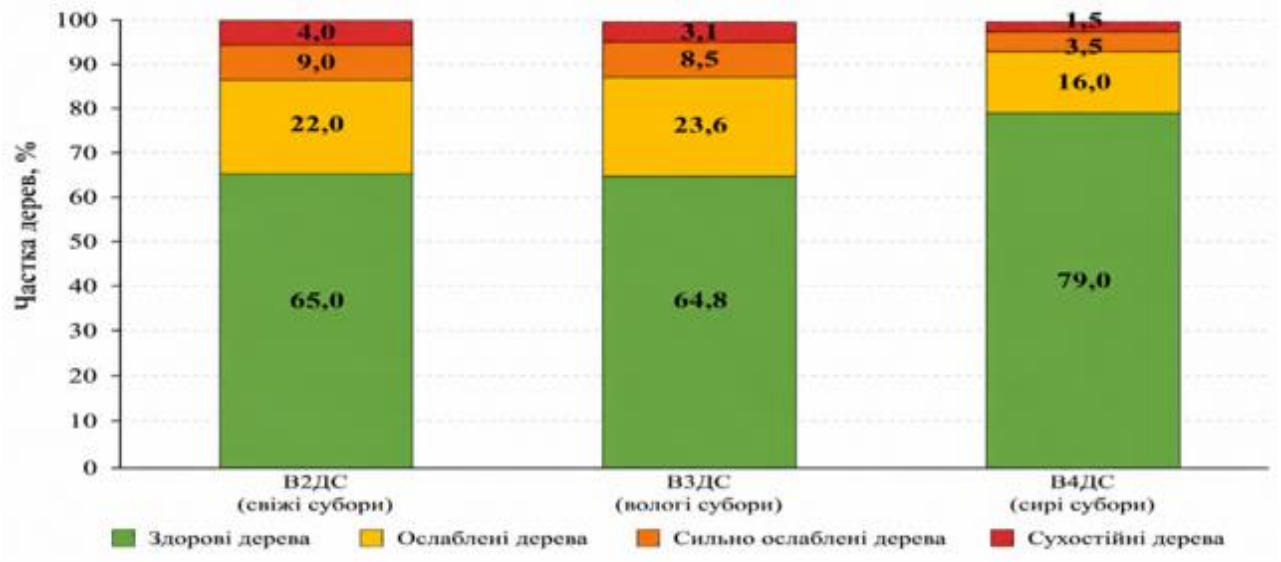


Рис. 3. Структура дерев різних категорій життєвого стану в умовах В2ДС, В3ДС та В4ДС

Таблиця 2

Середні показники санітарного стану деревостанів різного породного складу

Тип насадження	Пробні площі	Кількість ПП	Здорові дерева, %	Ослаблені дерева, %	Сильно ослаблені дерева, %	Сухостій, %	Середній індекс санітарного стану M ± SD	Рівень стійкості
Соснові та сосново-домінантні	ПП1, ПП2, ПП6, ПП9	4	53,8	29,3	12,0	5,0	1,68 ± 0,28	Середній–низький
Березові	ПП3	1	82,0	14,0	3,0	1,0	1,23*	Високий
Мішані	ПП4, ПП5, ПП7, ПП8, ПП10, ПП11, ПП12	7	72,7	19,1	5,7	2,4	1,38 ±0,17	Високий
Середнє	–	12	67,2	22,1	7,6	3,1	1,47 ± 0,25	

**Для березових насаджень статистичні показники варіації (SD) не визначалися, оскільки група представлена лише однією пробною площею.*

матичних чинників. Відомо, що стійкість лісових екосистем значною мірою залежить від видової структури насаджень, оскільки різні деревні породи характеризуються неоднаковою чутливістю до дефіциту вологи, коливань температурного режиму, ураження шкідниками та розвитку хвороб. Для оцінки цих особливостей було проведено порівняльний аналіз соснових, березових та мішаних деревостанів, представлених на дослідних пробних площах.

Основні показники санітарного стану насаджень різного породного складу наведені в таблиці 2.

Результати досліджень свідчать про виражені відмінності показників санітарного стану між насадженнями різного породного складу. Найгіршими показниками характеризуються соснові та сосново-домінантні деревостани, середній індекс санітарного стану яких становить 1,68 ± 0,28. Частка здорових дерев у цій групі не перевищує 53,8 %, тоді як сумарна кількість сильно ослаблених і сухостійних дерев досягає 17 %. Такі показники свідчать про підвищену вразливість соснових насаджень до комплексу несприятливих екологічних чинників.

Значно кращим станом характеризуються березові деревостани. Для них встановлено найнижче значення індексу санітарного стану – 1,23. Частка здорових дерев досягає 82 %, а сухостійних не

перевищує 1 %. Отримані результати свідчать про достатньо високий рівень адаптації берези до умов підвищеного зволоження та змін кліматичних факторів, характерних для території дослідження.

Найбільш збалансованими виявилися мішані деревостани. Середній індекс санітарного стану для цієї групи становить 1,38 ± 0,17, а частка здорових дерев перевищує 72 %. Порівняно невелика кількість ослаблених і сухостійних дерев свідчить про високу екологічну стійкість насаджень змішаного складу. Включення до складу деревостанів кількох порід сприяє більш ефективному використанню ресурсів середовища та знижує ризик масового пошкодження дерев під впливом окремих несприятливих факторів.

Отримані результати свідчать, що зі збільшенням видової різноманітності деревостанів їх санітарний стан покращується. Це підтверджує доцільність формування мішаних насаджень як одного з ефективних адаптаційних заходів до сучасних кліматичних змін.

Узагальнення результатів досліджень дозволило провести ранжування деревостанів за рівнем їх стійкості до впливу несприятливих еколого-кліматичних чинників (табл. 2).

Аналіз причин ослаблення насаджень показав, що провідним фактором є сучасні кліматичні зміни (рис. 4).

За результатами експертного оцінювання найбільшу частку серед чинників деградації становили кліматичні зміни та посушливі явища (35 %), біотичні пошкодження (30 %), пожежна небезпека (20 %), порушення водного режиму (10 %) та інші фактори (5 %). Установлено, що ослаблення деревостанів відбувається не під впливом окремого чинника, а є результатом їх комплексної взаємодії.

Підвищення температури повітря та дефіцит ґрунтової вологи знижують фізіологічну стійкість дерев, що створює сприятливі умови для розвитку стовбурових шкідників і патогенних організмів. Особливо чутливими до такого комплексу негативних факторів є стиглі соснові насадження, що переважають у структурі лісового фонду підприємства.

На основі проведених досліджень обґрунтовано комплекс заходів, спрямованих на підвищення екологічної стійкості лісових екосистем ДП «Олевський лісгосп АПК». До пріоритетних заходів належать формування мішаних різновікових деревостанів, своєчасне проведення санітарно-оздоровчих рубок, удосконалення системи лісопатологічного моніторингу, посилення протипожежної охорони та підтримання оптимального гідрологічного режиму. Реалізація запропонованих заходів сприятиме підвищенню адаптаційної здатності лісових екосистем до сучасних кліматичних змін, збереженню їх біорізноманіття та забезпеченню стабільного виконання природоохоронних і ресурсних функцій.

Висновки. Проведено комплексну екологічну оцінку стійкості лісових екосистем ДП «Олевський лісгосп АПК» в умовах сучасних кліматичних змін. Встановлено, що лісовий фонд підприємства представлений переважно сосновими деревостанами, а домінуючим типом лісорослинних умов є В3ДС, що займає 44,0 % площі вкритих лісовою рослинністю земель. Поєднання переважання соснових

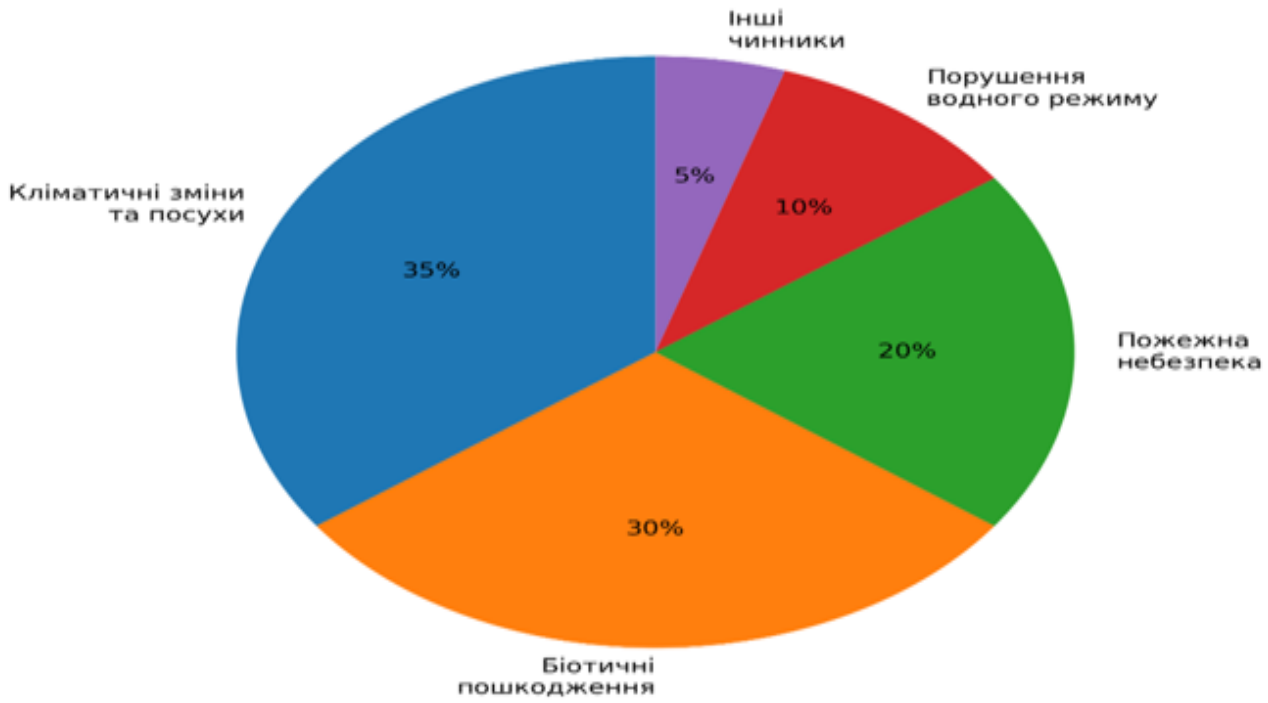


Рис. 4. Відносний вплив основних чинників ослаблення лісових екосистем

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

насаджень із легкими дерново-підзолистими ґрунтами зумовлює підвищену екологічну вразливість лісових екосистем до кліматичних змін.

За результатами польових досліджень встановлено, що середній індекс санітарного стану деревостанів становить 1,47, при цьому частка здорових дерев дорівнює 67,2 %, ослаблених – 22,1 %, сильно ослаблених – 7,6 %, а сухостійних – 3,1 %. Найбільш стійкими виявилися березові та мішані деревостани, тоді як найгірший санітарний стан характерний для стиглих соснових насаджень.

Встановлено відмінності санітарного стану насаджень залежно від типу лісорослинних умов. Найкращі показники санітарного стану встановлено для типу В4ДС (індекс 1,28), тоді як у типах В2ДС та В3ДС значення індексу становили відповідно 1,52 та 1,51, що свідчить про їх більшу чутливість до несприятливих еколого-кліматичних чинників.

Визначено, що основними чинниками ослаблення лісових екосистем є кліматичні зміни та посушливі явища (35 %), біотичні пошкодження (30 %), пожежна небезпека (20 %), порушення водного режиму (10 %) та інші фактори (5 %). Ослаблення насаджень є наслідком комплексної взаємодії кліматичного стресу, дефіциту вологи, поширення стовбурових шкідників і розвитку патогенних організмів.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати дослідження можуть бути використані під час організації системи екологічного моніторингу лісових екосистем Українського Полісся, планування природоохоронних і лісогосподарських заходів, спрямованих на підвищення екологічної стійкості деревостанів та їх адаптації до сучасних кліматичних змін.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх застосування під час проведення лісовпорядкування, лісопатологічного обстеження, розроблення регіональних програм охорони лісів, а також виконання подальших наукових досліджень з оцінювання впливу еколого-кліматичних чинників на функціонування лісових екосистем.

Література

1. IPCC. *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva: IPCC, 2023. 184 p. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
2. Pan Y., Birdsey R. A., Fang J. et al. A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science*. 2011. Vol. 333(6045). P. 988–993. DOI: 10.1126/science.1201609
3. Bonan G. B. Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. *Science*. 2008. Vol. 320. P. 1444–1449. DOI: 10.1126/science.1155121
4. Seidl R., Thom D., Kautz M. et al. Forest disturbances under climate change. *Nature Climate Change*. 2017. Vol. 7. P. 395–402. DOI: 10.1038/nclimate3303
5. Trumbore S., Brando P., Hartmann H. Forest health and global change. *Science*. 2015. Vol. 349(6250). P. 814–818. DOI: 10.1126/science.aac6759
6. Швиденко А. Й., Букша І. Ф., Краковська С. В. та ін. Вплив зміни клімату на ліси України. Харків : УкрНДІЛГА, 2017. 278 с.
7. Бородавка В. О., Гетьманчук А. І., Кичилюк О. В., Войтюк В. П. Патологічні процеси у всихаючих соснових насадженнях Волинського Полісся. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: *Лісівництво та декоративне садівництво*. 2016. Вип. 238. С. 102–118.
8. Остапенко Б. Ф., Ткач В. П. *Лісова типологія*. Харків : Плеяда, 2002. 204 с.
9. Гойчук А. Ф., Гордієнко М. І., Гордієнко Н. М., Макарчук Я. І., Гойчук Д. А. *Патологія дібров*. Київ : ННЦІАЕ, 2004. 470 с.
10. Andreieva O. Y. Climatic factors influencing the vulnerability of Scots pine to bark beetles attacks in the Central Polissya. *Forestry and Forest Melioration*. 2018. Vol. 133. P. 119–127.
11. Lindner M., Maroschek M., Netherer S. et al. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*. 2010. Vol. 259. P. 698–709. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.09.023
12. Jactel H., Bauhus J., Boberg J. et al. Tree diversity drives forest stand resistance to natural disturbances. *Current Forestry Reports*. 2017. Vol. 3. P. 223–243. DOI: 10.1007/s40725-017-0064-1
13. Nykytiuk Y., Kravchenko O., Pitsil A., Bambura V., Seredniak D. Global climate change may reduce the anti-erosion regulatory capacity of vegetation cover in Ukraine's Polissya and Forest-Steppe regions. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. 2025. Vol. 16(1). DOI: 10.15421/0225004
14. Методичні рекомендації щодо організації та проведення нагляду, обліку, прогнозу і захисту лісів від шкідників та хвороб. Харків: УкрНДІЛГА, 2020. 156 с.

Дата першого надходження статті до видання: 24.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

УДК 630*18:574.1](477.42)
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.32

МОНІТОРИНГОВИЙ АНАЛІЗ ФЛОРИСТИЧНОГО РІЗНОМАНІТТЯ ЛІСОВОГО ФОНДУ ПІВНІЧНО-СХІДНОЇ ЧАСТИНИ ЖИТОМИРСЬКОЇ ОБЛАСТІ

Лавріненко В.М. (orcid.org/0000-0001-5359-8702)
Український державний університет імені Михайла Драгоманова
вул. Пирогова, 9, 01601, Київ,
viktlav@ukr.net

Досліджено сучасний стан флористичного різноманіття лісових екосистем північно-східної частини Житомирської області як важливої складової природного каркасу Українського Полісся. Визначено видовий склад та екологічну структуру основних типів лісових угруповань, проаналізовано склад деревного, чагарникового, трав'яного, мохового і лишайникового ярусів, а також встановлено природоохоронне значення ідентифікованих видів. Установлено, що основу деревного ярусу формують сосна звичайна (*Pinus sylvestris* L.), береза повисла (*Betula pendula* Roth.), дуб звичайний (*Quercus robur* L.), осика (*Populus tremula* L.) та вільха чорна (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.). Соснові угруповання характеризуються переважанням ацидофільних та оліготрофних видів, зокрема чорниці (*Vaccinium myrtillus* L.), брусниці (*Vaccinium vitis-idaea* L.), щитника орляка (*Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn.) та зелених мохів. Березові й змішані деревостани відзначаються більшою участю неморальних видів – ліщини звичайної (*Corylus avellana* L.), калини звичайної (*Viburnum opulus* L.), бузини чорної (*Sambucus nigra* L.), яглиці звичайної (*Aegopodium podagraria* L.) та копитняка європейського (*Asarum europaeum* L.). Вільхові насадження приурочені до вологих і перезволожених екотопів та характеризуються участю крушини ламкої (*Frangula alnus* Mill.), черемхи звичайної (*Prunus padus* L.) та інших вологолюбних видів.

Виявлено локалітети раритетних видів рослин, серед яких лілія лісова (*Lilium martagon* L.), півники сибірські (*Iris sibirica* L.), плаунець заплавний (*Lycopodiella inundata* (L.) Holub), росичка середня (*Drosera intermedia* Hayne), сон розкритий (*Pulsatilla patens* (L.) Mill.) та представники родини Orchidaceae, зокрема зозулині черевички справжні (*Cypripedium calceolus* L.). У межах об'єктів Смарагдової мережі «Долина річки Ірша» (UA0000348), «Словечанський Кряж» (UA0000173) та «Чорнобильський біосферний заповідник» (UA0000046) встановлено 21 таксон раритетних судинних рослин. Найбільше різноманіття зафіксовано в межах «Долини річки Ірша» – 12 видів.

Отримані результати підтверджують високу флористичну та природоохоронну цінність лісових екосистем регіону. Видове різноманіття відображає значну мозаїчність умов зволоження, трофності, освітленості та структури природних оселищ. Для збереження раритетного компоненту необхідними є систематичний моніторинг стану популяцій, охорона локалітетів рідкісних видів, недопущення трансформації цінних оселищ та врахування природоохоронних обмежень під час планування господарської діяльності. *Ключові слова*: лісовий фонд, флора, фауна, біорізноманіття, раритетні види, Смарагдова мережа, Червона книга України, Бернська конвенція, природні оселища.

Monitoring-based assessment of floristic diversity in the forest fund of the north-eastern part of Zhytomyr region. Lavrinenko V.

The study provides a monitoring-based assessment of the current state of floristic diversity in forest ecosystems of the north-eastern part of Zhytomyr Region, which constitute an important component of the natural ecological framework of Ukrainian Polissia. The study aimed to characterise the species composition and ecological structure of the major forest communities, analyse the composition of their tree, shrub, herbaceous, bryophyte, and lichen layers, and assess the conservation significance of the identified plant species and habitats.

The results demonstrated that the tree layer is predominantly composed of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), silver birch (*Betula pendula* Roth.), pedunculate oak (*Quercus robur* L.), European aspen (*Populus tremula* L.), and black alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.). Pine communities are characterised by a predominance of acidophilous and oligotrophic species, including bilberry (*Vaccinium myrtillus* L.), lingonberry (*Vaccinium vitis-idaea* L.), bracken (*Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn.), and several bryophyte species. Birch and mixed forest stands exhibit a greater contribution of nemoral species, including common hazel (*Corylus avellana* L.), guelder rose (*Viburnum opulus* L.), black elderberry (*Sambucus nigra* L.), ground elder (*Aegopodium podagraria* L.), and European wild ginger (*Asarum europaeum* L.). Black alder stands are primarily associated with wet and waterlogged habitats and are characterised by the presence of alder buckthorn (*Frangula alnus* Mill.), bird cherry (*Prunus padus* L.), and other hygrophilous species.

The monitoring surveys identified localities of several rare and conservation-significant plant species, including martagon lily (*Lilium martagon* L.), Siberian iris (*Iris sibirica* L.), marsh clubmoss (*Lycopodiella inundata* (L.) Holub), oblong-leaved sundew (*Drosera intermedia* Hayne), pasque flower (*Pulsatilla patens* (L.) Mill.), and representatives of the family Orchidaceae, notably the lady's-slipper orchid (*Cypripedium calceolus* L.). Within the Emerald Network sites "Irsha river valley in Zhytomyr region" (UA0000348), "Slovechanskyi Kriazh" (UA0000173), and "Chornobylskyi Biosphere Reserve" (UA0000046), a total of 21 taxa of rare vascular plants were recorded. The highest floristic diversity was documented within the "Irsha river valley in Zhytomyr region" site, where 12 taxa were identified.

© Лавріненко В.М., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

The ecological analysis indicates that the identified rare species are associated with a broad range of habitat conditions, including wet and waterlogged habitats, forest communities, forest edges, clearings, meadows, and ecotonal areas. This ecological differentiation reflects the pronounced habitat heterogeneity of the study region and the presence of a diverse mosaic of microhabitats. The occurrence of orchid species and other rare vascular plants may serve as an important indicator of the conservation status and ecological integrity of the respective forest and semi-natural habitats.

The findings confirm the high floristic and conservation value of forest ecosystems in the north-eastern part of Zhytomyr Region and emphasise the importance of the area for the conservation of regional plant diversity. The recorded diversity of forest communities reflects substantial variation in moisture regime, soil fertility, light availability, and habitat structure. Maintaining this floristic diversity requires systematic monitoring of population status, protection of rare-species localities, prevention of habitat degradation and transformation, and the integration of biodiversity conservation requirements into forest management and other land-use planning practices. *Key words:* forest ecosystems, floristic diversity, vascular plants, forest communities, rare species, threatened species, biodiversity monitoring, Emerald Network, Red Data Book of Ukraine, Bern Convention, natural habitats, Ukrainian Polissia, Zhytomyr Region.

Лісові екосистеми Житомирської області є одними із ключових компонентів природного каркасу Українського Полісся та виконують широкий комплекс екологічних, середовищетвірних і ресурсних функцій. Вони забезпечують регуляцію водного режиму території, депонування атмосферного вуглецю, захист ґрунтів від ерозійних процесів, стабілізацію мікрокліматичних умов, підтримання трофічних та енергетичних зв'язків і створення різноманітних оселищ для рослинного та тваринного світу.

Особливого природоохоронного значення набувають види флори і фауни, занесені до Червоної книги України, а також види, що підлягають охороні відповідно до Конвенції про охорону дикої флори і фауни та природних середовищ існування в Європі (Бернської конвенції). Важливим напрямом збереження біорізноманіття є охорона природних оселищ, що мають європейське природоохоронне значення та представлені переважно на територіях природно-заповідного фонду й об'єктів Смарагдової мережі.

Вивчення біорізноманіття лісових екосистем північно-східної частини Житомирської області здійснювалося впродовж останніх років в рамках наукових досліджень природних територій, лісових масивів та об'єктів природно-заповідного фонду. Значний внесок у дослідження флористичного складу регіону зробили науковці Поліського національного університету. Флористичний склад окремих лісових екосистем та територій природно-заповідного фонду колишнього ДП «Коростенське лісомисливське господарство» досліджували О. Ю. Андреєва, Ф. Ф. Марков, Т. М. Іванюк, О. М. Корма та Г. В. Кірейцева [1]. Аналізували видовий склад судинних рослин, структуру рослинного покриву, особливості поширення окремих видів та показники флористичного різноманіття. Окремі компоненти тваринного світу лісових і водно-болотних екосистем регіону також були предметом спеціалізованих досліджень. Зокрема, вивчалися особливості поширення та стан популяцій бобра річкового (*Castor fiber* L.), у межах Ушомирського лісництва Коростенського лісового господарства Житомирської області [2].

Сучасна характеристика біорізноманіття північно-східної частини Житомирської області ґрунтується на результатах флористичних, фауністичних, геоботанічних та спеціалізованих природоохоронних досліджень. Водночас просторово-мозаїчна структура лісових екосистем, різноманітність типів лісорослинних умов та динамічний характер рослинного покриву зумовлюють необхідність проведення регулярних моніторингових досліджень.

Особливого значення набуває відстеження динаміки видового складу та стану популяцій індикаторних, рідкісних і охоронюваних видів, а також оцінювання змін структури природних оселищ під впливом природних та антропогенних чинників. Систематичний моніторинг дає змогу своєчасно виявляти негативні трансформації екосистем, оцінювати характер і ступінь впливу господарської діяльності та обґрунтовувати заходи щодо збереження біологічного різноманіття.

За результатами проведених моніторингових обстежень встановлено, що у фітоценотичній структурі лісових екосистем території дослідження основу деревостану формують: сосна звичайна (*Pinus sylvestris* L.), береза повисла (*Betula pendula* Roth.), дуб звичайний (*Quercus robur* L.), осика (*Populus tremula* L.) та вільха чорна (*Alnus glutinosa* G.). Співвідношення зазначених видів визначається типом лісорослинних умов, рівнем зволоження, ґрунтовими характеристиками, особливостями рельєфу та історією формування конкретних лісових угруповань. Поєднання хвойних і листяних деревних порід формує різноманітну просторову структуру лісових фітоценозів та забезпечує існування значної кількості видів, пов'язаних із різними ярусами рослинного покриву.

У соснових насадженнях значну роль у формуванні трав'яно-чагарничкового покриву відіграють види чорниця (*Vaccinium myrtillus* L.), брусниця (*Vaccinium vitis-idaea*, L.), щитник орляк (*Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn.), квасениця звичайна (*Oxalis acetosella* L.) та конвалія травнева (*Convallaria majalis* L.). Зазначені види характеризують переважно кислі та слабокислі ґрунти, різний ступінь освітленості й умови помірного зволоження. Їх співвідношення залежить від повноти деревостану, потужності лісової підстилки, вологості ґрунту та рівня антропогенного навантаження.

Моховий покрив соснових лісів представлений переважно плеврозієм Шребера (*Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt.), гілокомієм блискучим (*Hylocomium splendens* (Hedw.) Schimp.), дикраном багатоніжковим (*Dicranum polysetum* Sw.) та дикраном мітлоподібним (*Dicranum scoparium* Hedw.). Поєднання цих видів характеризує формування на поверхні ґрунту добре вираженого зеленомохового покриву, типового для соснових лісів Полісся. Переважання *Pleurozium schreberi* та *Dicranum polysetum* свідчить про кислу реакцію ґрунтового середовища, відносно низьку трофність субстрату та добре або помірно дреновані умови, характерні для соснових насаджень на піщаних і супіщаних ґрунтах. Водночас участь *Hylocomium splendens* та *Dicranum scoparium* вказує на наявність більш затінених, захищених від випаровування та достатньо зволожених мікрооселищ під наметом деревостану. Зокрема, *Hylocomium splendens* формує щільні мати в умовах стабільної вологості та затінення, тоді як *Dicranum scoparium* тяжіє до більш вологих і затінених ділянок порівняно з *Dicranum polysetum.* Встановлений видовий склад мохового покриву свідчить про формування помірно вологого, кислого та відносно стабільного лісового мікросередовища із достатнім затіненням поверхні ґрунту та зниженою інтенсивністю випаровування.

Розвинений моховий покрив сприяє накопиченню та утриманню вологи у верхньому горизонті ґрунту, формуванню органічної підстилки, стабілізації температурного режиму приземного шару та створенню численних мікрооселищ для ґрунтових безхребетних, грибів і мікроорганізмів. У комплексі з трав'яно-чагарничковим ярусом, представленим чорницею (*Vaccinium myrtillus* L.), брусницею (*Vaccinium vitis-idaea* L.) та щитником орляком (*Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn), такий склад підлогового покриву є характерним для бореалізованих соснових лісів із кислими, відносно бідними ґрунтами та помірним зволоженням**.** Подібне поєднання *Pleurozium schreberi*, *Dicranum polysetum* та *Hylocomium splendens* описане і для соснових та зеленомохових лісів Українського Полісся.

Важливим компонентом соснових лісів є також лишайникові угруповання. На ґрунтовому покриві відмічаються кладонія оленяча (*Cladonia rangiferina* (L.) F.H. Wigg.), кладонія лісова (*Cladonia arbuscula* (Wal.) Flotow) та кладонія бахромчаста (*Cladonia fimbriata* (L.) Fr.). На корі дерев трапляються епіфітні лишайники, зокрема гіпогімнія (*Hypogymnia physodes* (L.) Nyl.) та пармелія борозенчаста (*Parmelia sulcata* Taylor.).

На відміну від соснових у березових і змішаних деревостанах більш виражена участь неморальних компонентів підліску. До характерних видів належать: ліщина звичайна (*Corylus avellana* L.), бруслина бородавчаста (*Euonymus verrucosus* Scopoli.), горобина звичайна (Sorbus aucuparia L.), калина звичайна (*Viburnum opulus* L.) та бузина чорна (Sambucus nigra L.). Поєднання цих видів характеризує формування більш мезофітного лісового мікросередовища з підвищеною затіненістю, відносно стабільним температурно-вологим режимом та більш розвиненим органічним горизонтом ґрунту. Значна участь *Corylus avellana*, *Viburnum opulus* і *Sambucus nigra* свідчить про вищу, порівняно із сосновими угрупованнями, забезпеченість ґрунту вологою та елементами мінерального живлення. Зокрема, *Sambucus nigra* характерна для свіжих, помірно вологих ґрунтів, часто з підвищеною трофністю, тоді як ліщина формує щільний підлісок і сприяє розвитку мозаїчної структури трав'яного ярусу.

Наявність бруслини бородавчастої (*Euonymus verrucosus* Scop.) доповнює комплекс неморальних видів і вказує на умови, близькі до широколистяних та змішаних лісових угруповань. Утворення розвиненого підліску з ліщини, бруслини, калини та бузини створює неоднорідний вертикальний і горизонтальний простір із чергуванням затінених та напівзатінених мікрооселищ, підвищеною вологістю приземного шару повітря та накопиченням лісової підстилки. Така структура збільшує різноманіття мікрооселищ і створює сприятливі умови для трав'янистих рослин, грибів, безхребетних та інших компонентів лісової біоти. видовий склад підліску березових і змішаних деревостанів характеризує свіже або помірно вологе, відносно затінене та мезотрофне лісове середовище, яке за екологічними властивостями є багатшим і структурно складнішим порівняно з типовими сухішими сосновими угрупованнями.

Трав'яний ярус формують яглиця звичайна (*Aegopodium podagraria* L.), зірочник дубравний (*Stellaria nemorum* L.), медунка темна (*Pulmonaria obscura* Dum.), копитняк європейський (*Asarum europaeum* L.), підмаренник запашний (*Galium odoratum* (L.) Scopoli.) та фіалка запашна (*Viola odorata* L.). Поєднання цих видів характеризує формування під наметом деревостану свіжого, помірно вологого та затіненого лісового мікросередовища, типового для березових і змішаних деревостанів із вираженою участю неморальних компонентів. Значна участь яглиці звичайної свідчить про достатнє зволоження та відносно високий рівень забезпеченості ґрунту поживними речовинами, оскільки цей вид переважно пов'язаний із вологими, багатшими на поживні речовини ґрунтами та умовами часткового або значного затінення.

Наявність у видовому складі: копитняка європейського, підмаренника запашного та медунки темної додатково вказує на стабільний світловий режим під пологом лісу, помірну вологість і добре сформований гумусовий горизонт. *Asarum europaeum* є характерним тіньовитривалим компонентом широколистяних і змішаних лісів, тоді як *Galium odoratum* пов'язаний із затіненими лісовими ділянками зі свіжими, гумусованими та відносно багатими ґрун-

тами. *Pulmonaria obscura* також характерна для мезофільних і мезогігрофільних листяних та змішаних лісів із помірною вологістю. Видовий комплекс загалом свідчить про більш гумідні та трофні умови порівняно із сосновими лісами з домінуванням ацидофільних і оліготрофних видів.

У комплексі з неморальним підліском, представленим *Corylus avellana*, *Euonymus verrucosus*, *Viburnum opulus*, *Sambucus nigra*, та тіньовитривалим трав'яним ярусом із *Aegopodium podagraria*, *Asarum europaeum*, *Galium odoratum* і *Pulmonaria obscura*, мохово-лишайниковий покрив характеризує свіже, помірно вологе, затінене та відносно стабільне лісове мікросередовище. Така багатоярусна структура забезпечує диференціацію умов за освітленістю, температурою та вологістю і, відповідно, збільшує кількість доступних мікрооселищ для грибів, безхребетних, мікроорганізмів та інших компонентів лісової біоти.

Вільхові насадження, на відміну від березових та мішаних лісів, характеризуються підвищеною участю вологолюбних видів та приуроченістю до вологих і перезволожених екотопів. У деревостані переважають вільха чорна (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.), береза повисла (*Betula pendula* Roth) та осика (*Populus tremula* L.). Підлісок представлений ліщиною звичайною (*Corylus avellana* L.), крушиною ламкою (*Frangula alnus* Mill.) та черемхою звичайною (*Prunus padus* L.). Такий склад підліску свідчить про формування свіжого–вологого лісового мікросередовища з підвищеною вологістю повітря і ґрунту, періодичним перезволоженням та достатнім надходженням органічної речовини. Особливо показовою є участь *Frangula alnus* і *Prunus padus*, характерних для вологих лісових угруповань, у тому числі вільхових та заплавних лісів.

У трав'яному покриві відмічаються копитняк європейський (*Asarum europaeum* L.), гравілат міський (*Geum urbanum* L.), зірочник дубравний (*Stellaria nemorum* L.) та щитник орляк (*Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn). Поєднання *Asarum europaeum*, *Stellaria nemorum* і *Geum urbanum* характеризує затінені, достатньо зволожені та відносно багаті на поживні речовини умови під наметом деревостану. Зірочник дубравний є типовим компонентом вологих вільхових та ясенево-вільхових лісів, а гравілат міський і копитняк європейський належать до характерних компонентів мезофільних широколистяних та змішаних лісів. Важливою екологічною особливістю таких угруповань є підвищена вологоємність та здатність ґрунту тривалий час утримувати вологу, що пов'язано з близьким заляганням ґрунтових вод, періодичним надходженням поверхневих вод і накопиченням органічних решток. У найбільш знижених мікроділянках можуть формуватися умови тимчасового або тривалого перезволоження, тоді як на підвищених елементах мікрорельєфу зберігаються більш аеровані та мезофітні умови. Саме така просторова неоднорідність забезпечує формування мозаїчного комплексу мікрооселищ.

Одним із важливих результатів досліджень є виявлення локалітетів раритетних видів рослин. Значна частина таких видів приурочена до вологих, перезволожених, лісових, лучних та екотонних біотопів. Серед раритетних видів відмічені: лілія лісова (*Lilium martagon* L.), півники сибірські (*Iris sibirica* L.), плаун звичайний (*Lycopodium annotinum* L.), лікоподієлла заплавна (*Lycopodiella inundata* (L.) Holub.), росичка середня (*Drosera intermedia* Hayne.), ситник бульбистий (*Juncus bulbosus* L.) та сон розкритий (*Pulsatilla patens* (L.) Mill.). Екологічна приуроченість цих видів є неоднаковою. Частина з них пов'язана із вологими та перезволоженими умовами, тоді як інші тяжіють до сухіших соснових лісів, узлісь, галявин або відкритих лучних ділянок. Тому збереження їх популяцій залежить від підтримання комплексу специфічних умов місцезростання.

Особливу природоохоронну цінність становлять представники родини Orchidaceae. У досліджуваному регіоні відмічені булатка довголиста (*Cephalanthera longifolia* (L.) Fritsch.), булатка червона (*Cephalanthera rubra* (L.) Richard.), гніздівка звичайна (*Neottia nidus-avis* (L.) Richard.), зозулині сльози яйцевидні (*Listera ovata* (L.) R. Brown.), коручка морозниковидна (*Epipactis helleborine* (L.) Crantz.), любка дволиста (*Platanthera bifolia* (L.) Richard.), пальчатокорінник м'ясочервоний (*Dactylorhiza incarnata* (L.) Soó.), пальчатокорінник травневий (*Dactylorhiza majalis* (Rchb.) P.F. Hunt & Sum.), пальчатокорінник Фукса (*Dactylorhiza fuchsii* (Druce) Soó.) та зозулині черевички справжні (*Cypripedium calceolus* L.). Представники родини Orchidaceae характеризуються високою чутливістю до змін умов місцезростання. Їх наявність свідчить про збереженість природної структури лісових і лучних екосистем, достатньою кількістю відповідних мікрооселищ та відносну стабільність екологічних умов.

Значний видовий склад раритетної флори ідентифікується на території Смарагдової мережі, які мають європейське природоохоронне значення. Зокрема, у північно-східній частині Житомирської області представлені об'єкти Смарагдової мережі: Чорнобильський біосферний заповідник – Chornobylskyi Biosphere Reserve (UA0000046), долина річки Тетерів – Teteriv river valley (UA0000320), долина річки Случ у Житомирській області – Sluch river valley in Zhytomyr region (UA0000335), долина річки Ірша – Irsha river valley in Zhytomyr region (UA0000348) – та «Словечанський кряж» (UA0000173) [4].

Значний флористичний компонент який знаходиться під охороною Резолюції 6 Бернської конвенції [6] представлений, на територіях об'єктів «Словечанський кряж» (UA0000173), «Долина річки Ірша» (UA0000348), «Чорнобильський біосферний заповідник» (UA0000046) (табл. 1).

Таблиця 1

Види судинних рослин, занесені до Червоної книги України, виявлені під час моніторингових досліджень у межах об'єктів Смарагдової мережі

№ з/п	Родина	Вид	Категорія виду (ЧКУ, 2021)
«Долина річки Ірша» (UA0000348)			
1	Зозулинцеві (Орхідні) (*Orchidaceae*)	Булатка червона (*Cephalanthera rubra* (L.) Rich.)	рідкісний
2	Зозулинцеві (Орхідні) (*Orchidaceae*)	Коручка чемерникоподібна (коручка широколиста) (*Epipactis helleborine* (L.) Crantz)	неоцінений
3	Зозулинцеві (Орхідні) (*Orchidaceae*)	Любка дволиста (*Platanthera bifolia* L.)	неоцінений
4	Плаунові (*Lycopodiaceae*)	Плаунець заплавний (лікоподієлла заплавна) (*Lycopodiella inundata* L.)	вразливий
5	Зозулинцеві (Орхідні) (*Orchidaceae*)	Зозульки м'ясочервоні (*Dactylorhiza incarnata* L.)	вразливий
6	Лілійні (*Liliaceae*)	Лілія лісова (*Lilium martagon* L.)	неоцінений
7	Півникові (*Iridaceae*)	Півники сибірські (*Iris sibirica* L.)	вразливий
8	Зозулинцеві (Орхідні) (*Orchidaceae*)	Зозульки Фукса (*Dactylorhiza fuchsii* Druce)	неоцінений
9	Ситникові (*Juncaceae*)	Ситник бульбистий (*Juncus bulbosus* L.)	вразливий
10	Росичкові (*Droseraceae*)	Росичка середня (*Drosera intermedia* Hayne)	вразливий
11	Жовтецеві (*Ranunculaceae*)	Сон розкритий (*Pulsatilla patens* L.)	неоцінений
12	Зозулинцеві (Орхідні) (*Orchidaceae*)	Зозулині черевички справжні (*Cypripedium calceolus* L.)	вразливий
«Словечанський Кряж» (UA0000173)			
13	Росичкові (*Droseraceae*)	Альдрованда пухирчаста (*Aldrovanda vesiculosa* L.)	рідкісний
14	Зозулинцеві (Орхідні) (*Orchidaceae*)	Зозулині черевички справжні (*Cypripedium calceolus* L.)	вразливий
15	Айстрові (Складноцвіті) (*Asteraceae*)	Юринея волошковидна (*Jurinea cyanoides* (L.) Rchb.)	рідкісний
16	Жовтецеві (*Ranunculaceae*)	Сон розкритий (*Pulsatilla patens* L.)	неоцінений
17	Вересові (*Ericaceae*)	Рододендрон жовтий (*Rhododendron luteum* Sweet)	–
«Чорнобильський біосферний заповідник» (UA0000046)			
18	Дзвоникові (*Campanulaceae*)	Дзвінка лілієлиста (аденофора лілієлиста) (*Adenophora lilifolia* L.)	–
19	Росичкові (*Droseraceae*)	Альдрованда пухирчаста (*Aldrovanda vesiculosa* L.)	рідкісний
20	Айстрові (Складноцвіті) (*Asteraceae*)	Серпій вовконоголистий (клязея вовконоголиста) (*Klasea lycopifolia* Vill.)	вразливий
21	Жовтецеві (*Ranunculaceae*)	Сон розкритий (*Pulsatilla patens* L.)	неоцінений

За результатами моніторингових досліджень у межах зазначених вище об'єктів Смарагдової мережі «Долина річки Ірша» (UA0000348), «Словечанський Кряж» (UA0000173) та «Чорнобильський біосферний заповідник» (UA0000046) встановлено наявність раритетного компоненту флори, представленого видами судинних рослин, що мають природоохоронне значення, зокрема наведено – 21 таксон, при цьому найбільша кількість видів зафіксована для об'єкта «Долина річки Ірша» – 12 видів, для «Словечанського Кряжу» – 5, для «Чорнобильського біосферного заповідника» – 4 види.

У таксономічній структурі виявленого раритетного флористичного компоненту безумовно переважають покритонасінні рослини (*Magnoliophyta* (=*Angiospermae*)). Лише один представник – плаунець заплавний (*Lycopodiella inundata* (L.) Holub) – належить до плауноподібних (*Lycopodiophyta*). Такий розподіл відповідає загальній структурі судинної флори досліджуваного регіону, де основну частину видового різноманіття формують покритонасінні.

Особливу роль у складі раритетної флори відіграють представники родини Orchidaceae. В межах об'єкта «Долина річки Ірша» виявлено булатку червону (*Cephalanthera rubra*), коручку чемерникоподібну (*Epipactis helleborine*), любку дволисту (*Platanthera bifolia*), зозульки м'ясочервоні (*Dactylorhiza incarnata*), зозульки Фукса (*Dactylorhiza*

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

fuchsii) та зозулині черевички справжні (*Cypripedium calceolus*). Представники цієї родини характеризуються високою чутливістю до трансформації умов місцезростання, тому їх наявність може розглядатися як показник збереженості природної структури відповідних лісових, лучних та екотонних оселищ. Загалом це узгоджується з результатами досліджень, наведеними у статті, відповідно до яких орхідні є одним із найбільш цінних компонентів раритетної флори регіону.

Екологічний аналіз наведених видів свідчить про їх приуроченість до різноманітних типів місцезростань. Частина видів пов'язана із вологими та перезволоженими екотопами, зокрема альдрованда пухирчаста (*Aldrovanda vesiculosa*), плаунець заплавний (*Lycopodiella inundata*) та ситник бульбистий (*Juncus bulbosus*). Інші види тяжіють до лісових угруповань, узлісь, галявин і лучних ділянок. Така екологічна диференціація підтверджує високу мозаїчність природних умов досліджуваної території та значну різноманітність сформованих у її межах мікрооселищ.

За категоріями охоронного статусу серед наведених у таблиці видів представлені рідкісні, вразливі та неоцінені таксони. Наявність видів із категоріями «рідкісний» і «вразливий», зокрема зозулиних черевичків справжніх (*Cypripedium calceolus*), альдрованди пухирчастої (*Aldrovanda vesiculosa*), юринеї волошковидної (*Jurinea cyanoides*), плаунця заплавного (*Lycopodiella inundata*) та серпія вовконоголистого (*Klasea lycopifolia*), підвищує природоохоронну цінність відповідних оселищ. Водночас наявність видів зі статусом «неоцінений» також потребує врахування під час моніторингу, оскільки їх фактичний стан і динаміка популяцій мають визначатися з урахуванням конкретних умов місцезростання.

Отже, проведені дослідження підтвердили високе флористичне та фітоценотичне різноманіття лісових екосистем північно-східної частини Житомирської області, зумовлене мозаїчністю лісорослинних умов, різним рівнем зволоження, трофності ґрунтів та структурною організацією лісових угруповань. Встановлено диференціацію видового складу соснових, березових, змішаних і вільхових лісів та виявлено значний раритетний компонент флори. У межах досліджених об'єктів Смарагдової мережі встановлено наявність 21 таксону раритетних судинних рослин, серед яких особливу природоохоронну цінність мають представники родини Orchidaceae та види, пов'язані з вологими, перезволоженими, лісовими, лучними й екотонними оселищами.

Отримані результати можуть бути використані як науково-інформаційна основа для проведення післяпроєктного моніторингу лісових господарств Житомирської області, зокрема для оцінювання динаміки видового складу та стану популяцій рослин, виявлення можливих змін природних оселищ, визначення потенційних антропогенних впливів та своєчасного коригування природоохоронних заходів. Сформовані відомості про екологічну приуроченість видів, структуру лісових угруповань і локалітети раритетної флори можуть застосовуватися як порівняльна база під час повторних польових обстежень та оцінювання змін стану лісових екосистем у динаміці. Перспективним є подальше накопичення та систематизація результатів моніторингу із формуванням регіональної бази даних поширення рідкісних і охоронюваних видів та природних оселищ, що сприятиме науковому обґрунтуванню заходів зі збереження біорізноманіття та екологічно збалансованого ведення лісового господарства на території Житомирщини.

Література

1. Андреєва О. Ю., Марков Ф. Ф., Іванюк Т. М., Корма О. М., Кірейцева Г. В. Різноманіття флори на деяких об'єктах природно-заповідного фонду ДП «Коростенське лісомисливське господарство» Житомирської області. *Науковий вісник НЛТУ України*. Т. 32, № 4. 2022. С. 12–17. DOI: 10.36930/40320402.
2. Старцев О.О. Еколого-біологічні особливості популяції бобра річкового в умовах Ушомирського лісництва Філії «Коростенське лісомисливське господарство». Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 205 «Лісове господарство». Поліський національний університет, Житомир. 2024.37 с.
3. Червона книга України. Рослинний світ. URL: https://redbook-ua.org/ (Дата звернення: 27.08.2026).
4. Emerald Network-General Viewer. URL: https://emerald.eea.europa.eu/ (Дата звернення: 02.09.2026)
5. Convention on the Conservation of European Wildlife and Natural Habitats. Bern, 19 September 1979. Council of Europe. URL: https://www.coe.int/en/web/conventions/full-list/-/conventions/treaty/104 (Date of access: 27.08.2026).
6. Resolution No. 6 (1998) listing the species requiring specific habitat conservation measures. Standing Committee of the Bern Convention. Strasbourg, 1998.

Дата першого надходження статті до видання: 24.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

УДК 630*18:551.583:630*43(477)
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.33

АДАПТАЦІЯ ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМ УКРАЇНИ ДО ЗМІНИ КЛІМАТУ ЗА УМОВ ЗРОСТАННЯ РИЗИКУ ВИНИКНЕННЯ ТА ПОШИРЕННЯ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ

Нонік Л.Ю. (orcid.org/0000-0003-4234-8948),
Пацева І.Г. (orcid.org/0000-0001-6271-7355),
Павленко О.С. (orcid.org/0009-0000-3640-7038)
Державний університет «Житомирська політехніка»
вул. Чуднівська, 103, 10005, м. Житомир
kgt_nlyu@ztu.edu.ua, rig@ztu.edu.ua, phde2251_pos@student.ztu.edu.ua

У статті розглянуто напрями адаптації лісових екосистем України до зміни клімату за умов зростання ризику виникнення та поширення лісових пожеж. Метою дослідження є систематизація напрямів адаптації лісових екосистем України до зміни клімату за умов зростання ризику виникнення та поширення лісових пожеж і визначення критеріїв їх застосування з урахуванням природно-кліматичних та безпекових умов України. Методологічну основу становлять аналіз, порівняння, узагальнення та систематизація українських і зарубіжних наукових праць, присвячених впливу підвищення температури, посух, біотичних порушень і пожеж на стан лісів, а також підходам до адаптивного лісоуправління. Встановлено, що пожежна небезпека формується внаслідок поєднання кліматичних, біотичних, антропогенних і воєнних чинників. Підвищення температури, дефіцит вологи, ослаблення деревостанів, накопичення горючих матеріалів, поширення шкідників і хвороб, а також обмеження доступу до лісів через бойові дії та мінування посилюють ризик виникнення і масштабного поширення пожеж. Наслідками є пошкодження деревостанів, деградація ґрунтів, порушення природного поновлення, втрата біорізноманіття та зміни вуглецевого балансу. Систематизовано чотири взаємопов'язані напрями адаптації: запобігання пожежам і зниження запасів горючих матеріалів; формування змішаних, різновікових і структурно різноманітних насаджень; удосконалення моніторингу та прогнозування; кліматично орієнтоване післяпожежне відновлення. Визначено основні критерії регіональної диференціації адаптаційних заходів, зокрема природну зону, породний склад, водний режим, стан ґрунтів, інтенсивність пошкодження, потенціал природного поновлення та безпекову доступність території. Наукова новизна полягає у комплексному поєднанні кліматичних, пожежних, біотичних, воєнних і управлінських чинників у межах єдиної системи адаптації. Практичне значення результатів полягає у можливості їх використання під час підготовки регіональних планів адаптації, оцінювання пожежної небезпеки, удосконалення моніторингу та вибору способів відновлення пошкоджених лісів. Комплексне застосування визначених заходів сприятиме зменшенню пожежної вразливості та збереженню основних екосистемних функцій лісів. *Ключові слова:* лісові екосистеми; зміна клімату; адаптивне лісоуправління; лісові пожежі; пожежний ризик; моніторинг лісів; післяпожежне відновлення.

Adaptation of Ukraine's forest ecosystems to climate change under the increasing risk of wildfire occurrence and spread. Nonik L., Patseva I., Pavlenko O.

The article examines key approaches to adapting Ukraine's forest ecosystems to climate change under the increasing risk of wildfire occurrence and spread. The study aims to systematize the main approaches to adapting Ukraine's forest ecosystems to climate change under the increasing risk of wildfire occurrence and spread, and to identify criteria for their application considering the country's environmental, climatic, and security conditions. The methodological framework is based on the analysis, comparison, synthesis, and systematization of Ukrainian and international scientific publications addressing the effects of rising temperatures, droughts, biotic disturbances, and wildfires on forest condition, as well as approaches to adaptive forest management. It has been established that wildfire risk results from the combined influence of climatic, biotic, anthropogenic, and wartime factors. Rising temperatures, moisture deficits, weakened forest stands, increased fuel loads, the spread of pests and diseases, and restricted access to forest areas due to hostilities and landmine contamination increase the likelihood of both fire occurrence and large-scale fire spread. The resulting impacts include damage to forest stands, soil degradation, disruption of natural regeneration, biodiversity loss, and changes in the forest carbon balance. Four interrelated areas of adaptation have been systematized: wildfire prevention and fuel-load reduction; the establishment of mixed, uneven-aged, and structurally diverse stands; improved monitoring and risk forecasting; and climate-adaptive post-fire restoration. The main criteria for the regional differentiation of adaptation measures have been identified, including the natural zone, species composition, water regime, soil condition, severity of damage, natural regeneration potential, and the safe accessibility of forest areas. The scientific novelty of the study lies in integrating climatic, fire-related, biotic, wartime, and management factors within a unified adaptation framework. The practical significance of the findings lies in their potential application in the preparation of regional adaptation plans, wildfire risk assessment, improvement of forest monitoring systems, and selection of appropriate methods for restoring damaged forests. The integrated implementation of the identified measures will contribute to reducing forest vulnerability to wildfires and maintaining the principal ecosystem functions of forests. *Key words:* forest ecosystems; climate change; adaptive forest management; wildfires; wildfire risk; forest monitoring; post-fire restoration.

© Нонік Л.Ю., Пацева І.Г., Павленко О.С., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. Лісові екосистеми регулюють клімат і водний режим, захищають ґрунти та підтримують біорізноманіття. Зростання температури, зміна режиму опадів і тривалі посухи погіршують водозабезпечення деревостанів, знижують їхню продуктивність і посилюють уразливість до шкідників, хвороб та інших порушень [1–5]. Одночасно висушування підстилки й накопичення горючих матеріалів збільшують імовірність виникнення та масштабного поширення лісових пожеж [6–11].

Для України ці процеси ускладнюються антропогенним навантаженням і наслідками воєнних дій, що обмежують доступ до окремих лісових масивів, проведення профілактичних заходів і своєчасне гасіння пожеж [12–14]. Тому охорона та відновлення лісів потребують переходу до адаптивного управління, яке поєднує оцінювання ризиків, підвищення стійкості насаджень, моніторинг і післяпожежне відновлення [15–18].

Актуальність дослідження. Пожежні ризики дедалі більше залежать не від одного чинника, а від взаємодії кліматичних змін, стану насаджень, антропогенного навантаження та безпекових обмежень. Відсутність узгодженого підходу до профілактики, моніторингу й відновлення знижує ефективність управлінських рішень. Мета статті – систематизувати напрями адаптації лісових екосистем України до зміни клімату за умов зростання ризику виникнення та поширення лісових пожеж і визначити критерії їх застосування з урахуванням природно-кліматичних та безпекових умов України.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження пов'язане із завданнями адаптації лісового господарства до зміни клімату, зниження пожежної небезпеки та відновлення пошкоджених територій. Авторський внесок полягає у зіставленні сучасних підходів і формуванні узгодженої системи заходів, придатної для використання під час планування моніторингу, протипожежної охорони та лісовідновлення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних працях зміни стану лісів пов'язують із підвищенням температури, дефіцитом вологи, зміною ареалів деревних порід, зниженням приросту та посиленням біотичних загроз [1–5]. Окремий напрям становлять дослідження кліматично зумовленої пожежної небезпеки, просторового картування ризиків, екологічних наслідків пожеж і викидів вуглецю [6–12, 20, 21]. У сучасних українських працях також обґрунтовуються багатофакторні підходи до оцінювання екологічних ризиків лісових пожеж з урахуванням кліматичних, антропогенних і воєнних детермінантів [20], а також застосовується кластерний аналіз для систематизації екосистемних, технологічних та управлінських напрямів досліджень лісових пожеж [21].

Українські публікації також висвітлюють вплив воєнних дій на доступність лісів, протипожежну інфраструктуру та можливості польових обстежень [13, 14, 19]. У працях з адаптивного лісоуправління обґрунтовуються формування змішаних і структурно різноманітних насаджень, удосконалення моніторингу, диференційоване управління горючими матеріалами та природоорієнтоване відновлення [15–18]. У працях з адаптивного лісоуправління обґрунтовуються формування змішаних і структурно різноманітних насаджень, удосконалення моніторингу, диференційоване управління горючими матеріалами та природоорієнтоване відновлення [15–18]. Аналіз публікацій свідчить, що найбільш ґрунтовно досліджено кліматичні передумови формування пожежної небезпеки та екологічні наслідки пожеж, тоді як питання інтеграції профілактичних, моніторингових і відновних заходів з урахуванням воєнних обмежень залишаються висвітленими фрагментарно.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Недостатньо узгодженими залишаються критерії вибору між природним поновленням і штучним лісовідновленням, підходи до регіональної диференціації заходів та врахування воєнних обмежень. Потребує систематизації взаємозв'язок між запобіганням пожежам, підвищенням стійкості деревостанів, моніторингом і післяпожежним відновленням.

Новизна. Наукова новизна полягає у комплексній систематизації сучасних підходів до адаптації лісових екосистем України та їх структурованому поєднанні в межах послідовного циклу адаптивного лісоуправління з урахуванням кліматичних, пожежних, біотичних, воєнних та управлінських чинників. Адаптаційні заходи згруповано за чотирма взаємопов'язаними напрямами: запобігання пожежам і зниження запасів горючих матеріалів; підвищення видової, вікової та структурної стійкості насаджень; удосконалення моніторингу й прогнозування пожежних ризиків; кліматично орієнтоване післяпожежне відновлення. Запропонований підхід дає змогу поєднати короткострокове зниження пожежної небезпеки з довгостроковим підвищенням стійкості лісових екосистем.

Методологічне або загальнонаукове значення. Дослідження виконано у форматі аналітичного огляду українських і зарубіжних наукових праць та аналітичних звітів, дібраних відповідно до мети й тематичної спрямованості статті. Методологічну основу становили методи аналізу, порівняння, синтезу, узагальнення та систематизації. Опрацьовані джерела було згруповано за чотирма тематичними блоками: вплив кліматичних змін на стан лісів; формування пожежної небезпеки та екологічні наслідки пожеж; адаптивне лісоуправління; післяпожежне відновлення та управління лісами в умовах воєнних обмежень. Загальнонаукове значення дослідження полягає у комплексному розгляді взаємозв'язків між

кліматичними, біотичними, пожежними та воєнними чинниками, а також у систематизації підходів до адаптивного лісоуправління і післяпожежного відновлення.

Викладення основного матеріалу. Кліматичні зміни впливають на лісові екосистеми насамперед через порушення водного й температурного режимів. Підвищення середніх і максимальних температур збільшує випаровування вологи з поверхні ґрунту та посилює транспіраційне навантаження на деревні рослини. За тривалих бездощових періодів запаси доступної ґрунтової вологи скорочуються, унаслідок чого знижується інтенсивність ростових процесів, зменшується радіальний приріст, погіршується стан крони та послаблюється загальна життєздатність дерев. Повторення посушливих періодів упродовж кількох років може спричиняти накопичувальний ефект, коли насадження не встигають відновити фізіологічні функції між окремими кліматичними стресами [1–5].

Ослаблені дерева стають більш сприйнятливими до шкідників і збудників хвороб. Водночас підвищення температури може створювати сприятливіші умови для розвитку окремих видів комах, збільшення кількості їхніх генерацій протягом сезону та поширення на нові території. Унаслідок цього кліматичні та біотичні порушення часто діють не окремо, а послідовно або одночасно. Посуха послаблює деревостан, біотичне пошкодження прискорює відмирання дерев, а накопичення сухостою, відмерлих гілок і сухої лісової підстилки збільшує запас горючих матеріалів. Таким чином формується ланцюг взаємопов'язаних процесів, за якого зниження фізіологічної стійкості насаджень безпосередньо посилює їхню пожежну вразливість [3–5].

Реакція лісових екосистем на зміну клімату не є однаковою. Вона залежить від природної зони, типу лісорослинних умов, породного складу, віку й густоти деревостану, особливостей ґрунту, рельєфу та попереднього господарського впливу. Насадження, сформовані за межами оптимальних для певної породи умов, можуть швидше втрачати стійкість у разі посилення посушливості. Молоді, середньовікові та стиглі деревостани також відрізняються за здатністю реагувати на дефіцит вологи та високі температури. Тому оцінювання кліматичної вразливості має проводитися не лише за видовою належністю, а й з урахуванням структури конкретного насадження та локальних умов його росту [1, 2, 4, 5].

Для забезпечення термінологічної визначеності в межах дослідження пожежну небезпеку розглянуто як сукупність природних, кліматичних, біотичних та антропогенних умов, що сприяють виникненню й поширенню пожежі. Пожежна вразливість характеризує чутливість лісової екосистеми до впливу вогню та її здатність зберігати структуру й основні функції після пошкодження. Пожежний ризик визначено як поєднання ймовірності виникнення та поширення пожежі з масштабом її потенційних наслідків для лісових екосистем, прилеглих територій та безпеки населення [20].

Пожежна небезпека формується внаслідок взаємодії погодних умов, характеристик горючих матеріалів, структури насаджень і джерел займання. Висока температура, низька відносна вологість повітря, тривалі бездощові періоди та вітер прискорюють висушування лісової підстилки й наземної рослинності. За таких умов навіть незначне займання може швидко поширитися на значну площу. Водночас інтенсивність горіння визначається не лише кількістю горючого матеріалу, а й його просторовим розміщенням, ступенем висушування та наявністю вертикальних зв'язків між підстилкою, підліском і кронами дерев [6, 8, 11].

Особливо вразливими є однорідні хвойні насадження, у яких поєднуються значні запаси легкозаймистої підстилки, смолистість деревини та відносно однорідна просторова структура. У таких лісах низова пожежа за певних погодних умов може переходити у верхову. Водночас сама наявність змішаного насадження не гарантує низької пожежної небезпеки. Важливе значення мають густота деревостану, частка сухостою, стан підліску, зімкнутість крон, накопичення опалих гілок і характер трав'яного покриву. Отже, оцінювання пожежного ризику потребує врахування комплексу характеристик, а не лише переважної деревної породи [6, 8, 11].

Антропогенна діяльність залишається одним з основних джерел займання, однак кліматичні умови визначають імовірність того, що локальний осередок перетвориться на масштабну пожежу. Особливого значення набувають зони контакту лісових масивів із населеними пунктами, автомобільними шляхами, залізничною інфраструктурою та сільськогосподарськими угіддями. Картування таких територій дає змогу визначати ділянки, на яких необхідно посилювати спостереження, підтримувати проїзний стан доріг, облаштовувати протипожежні елементи та проводити інформаційну роботу з населенням [7].

Наслідки пожеж залежать від їхньої інтенсивності, тривалості, сезону виникнення, площі поширення та стану екосистеми до загоряння. Пожежа низької інтенсивності може спричинити часткове пошкодження підстилки й нижніх частин стовбурів, тоді як сильний вогневий вплив призводить до загибелі деревостану, знищення підросту, зміни трав'яного покриву та пошкодження верхніх горизонтів ґрунту. Навіть за збереження частини дерев їхній стан може погіршуватися протягом наступних років через пошкодження кореневих систем, стовбурів і провідних тканин [9–11].

Пірогенний вплив змінює умови природного поновлення. З одного боку, відкриття ґрунтової поверхні та зменшення конкуренції іноді створюють умови для появи сходів. З іншого боку, значне пошкодження насіннєвих дерев, перегрівання

ґрунту, втрата підстилки, ерозійні процеси й повторні посухи можуть істотно обмежувати відновлення. Тому наявність сходів у перший післяпожежний період ще не свідчить про успішне формування нового покоління лісу. Необхідним є спостереження за їхньою життєздатністю, видовим складом і відповідністю майбутнім кліматичним умовам [10, 11, 14, 18].

Окремим наслідком є зміна ґрунтових властивостей. Інтенсивне нагрівання може зменшувати вміст органічної речовини, погіршувати структуру верхнього шару ґрунту та змінювати доступність елементів живлення. На схилах і ділянках із повністю знищеним рослинним покривом зростає небезпека водної та вітрової ерозії. Пошкодження ґрунтового покриву також знижує здатність території утримувати вологу, що ускладнює відновлення рослинності та може посилювати вплив наступних посушливих періодів [9–11].

Лісові пожежі впливають і на вуглецевий баланс. Під час горіння в атмосферу надходить частина вуглецю, накопиченого у деревині, підстилці та ґрунтовій органічній речовині. Після пошкодження деревостану одночасно зменшується здатність екосистеми поглинати вуглекислий газ. Подальший баланс залежить від швидкості відновлення рослинного покриву, масштабів відмирання деревини, інтенсивності її розкладання та повторюваності пожеж. Отже, пірогенні порушення є не лише локальною лісогосподарською проблемою, а й чинником, пов’язаним із регулюванням вуглецевого циклу [12].

В умовах війни звичайні механізми формування пожежної небезпеки доповнюються новими джерелами ризику. Обстріли, вибухи й пошкодження інфраструктури можуть спричиняти займання, а мінування територій і наявність нерозірваних боєприпасів обмежують можливість проведення профілактичних заходів та безпечного гасіння. Руйнування або блокування лісових доріг збільшує час реагування, тоді як відсутність доступу до окремих масивів ускладнює наземне оцінювання їхнього стану. Тому воєнний чинник необхідно розглядати не лише як додаткове джерело пожеж, а і як суттєве управлінське обмеження [13, 14, 19].

За таких умов адаптація лісових екосистем має охоплювати повний цикл управління: оцінювання вразливості, запобігання пожежам, раннє виявлення загорянь, зменшення можливих наслідків та післяпожежне відновлення [15, 18]. Першим напрямом є профілактика пожеж. Вона передбачає картування територій за рівнем ризику, підтримання протипожежної інфраструктури, контроль доступності лісових доріг, визначення пріоритетних ділянок спостереження та диференційоване управління наземними горючими матеріалами.

Управління горючими матеріалами повинно враховувати як пожежну, так і природоохоронну функцію мертвої деревини. Вона є середовищем існування для багатьох організмів, бере участь у кругообігу речовин, утриманні вологи та формуванні ґрунту. Тому її повне вилучення може негативно позначитися на біорізноманітті й екосистемних процесах. Водночас надмірне накопичення сухої деревини поблизу населених пунктів, доріг, об’єктів інфраструктури та в насадженнях із високою пожежною небезпекою потребує регулювання. Рішення мають прийматися диференційовано, з урахуванням типу лісу, природоохоронного статусу території, доступності для гасіння та очікуваної поведінки вогню [11, 15].

Другим напрямом є формування насаджень, стійкіших до посух, пожеж і біотичних порушень. Видова, вікова та просторова різноманітність зменшує ймовірність одночасної загибелі всіх компонентів деревостану, оскільки різні види та вікові групи неоднаково реагують на дефіцит вологи, високу температуру, шкідників і вогонь. Проте змішаність не повинна розглядатися як механічне збільшення кількості порід. Поєднання видів має відповідати типу лісорослинних умов, властивостям ґрунту, водному режиму та прогнозованим кліматичним змінам [15–17].

Перевагу доцільно надавати місцевим видам і репродуктивному матеріалу відповідного походження, адаптованим до природно-кліматичних умов певного регіону. Водночас за швидкої зміни клімату необхідно оцінювати, чи забезпечуватимуть обрані види та походження посадкового матеріалу стійкість майбутніх насаджень упродовж наступних десятиліть. Використання посадкового матеріалу з інших кліматичних районів можливе лише після оцінювання його екологічної сумісності та потенційних ризиків. Важливим елементом є збереження генетичного різноманіття, оскільки воно підвищує здатність популяцій пристосовуватися до поступових змін середовища [15–17].

Регулювання густоти деревостанів також має адаптаційне значення. Надмірна густота посилює конкуренцію за воду, поживні речовини та світло, що може збільшувати чутливість дерев до посухи. Проте надмірне зрідження сприяє нагріванню ґрунту, посиленню випаровування та розвитку трав’яного покриву, який у посушливий період може ставати додатковим горючим матеріалом. Тому інтенсивність догляду необхідно визначати залежно від віку насадження, породного складу та місцевого водного режиму [15, 16].

Третім напрямом є вдосконалення моніторингу та прогнозування пожежних ризиків. Ефективна система повинна поєднувати метеорологічні показники, супутникові спостереження, геоінформаційне картування та наземні обстеження. Метеорологічні дані дають змогу оцінювати поточний рівень пожежної небезпеки, супутникові знімки – виявляти осередки горіння й визначати площі пошкоджень, а геоінформаційні системи – поєднувати інформацію про

типи лісу, рельєф, інфраструктуру, населені пункти та попередні пожежі [7, 15, 21].

Наземні обстеження залишаються необхідними для оцінювання інтенсивності пошкодження, життєздатності дерев, стану ґрунтів і можливостей природного поновлення. Дистанційні методи не повинні повністю замінювати польові дослідження, однак вони дають змогу визначати пріоритетні ділянки для обстеження та зменшувати витрати часу. Особливого значення вони набувають на територіях, доступ до яких обмежений через мінування або бойові дії. До проведення розмінування дистанційне оцінювання може бути основним джерелом інформації про масштаби пошкодження й динаміку рослинного покриву [7, 13–15].

Четвертим напрямом є кліматично орієнтоване післяпожежне відновлення. Вибір між природним поновленням і штучним садінням повинен ґрунтуватися на оцінюванні інтенсивності пожежі, стану ґрунту, збереженості насіннєвих дерев, кількості й життєздатності підросту, ризику ерозії та прогнозованих кліматичних умов. На ділянках, де природне поновлення є достатнім і представлене екологічно відповідними видами, доцільно підтримувати природні відновні процеси. Такий підхід сприяє збереженню місцевого генетичного матеріалу та формуванню структури, пристосованої до конкретних умов [14, 15, 18].

Штучне лісовідновлення необхідне за відсутності життєздатного поновлення, значної загибелі насіннєвих дерев, високого ризику ерозії або потреби змінити породний склад, який виявився нестійким до посухи й пожеж. Водночас відтворення попереднього деревостану без аналізу причин його вразливості може закріпити ризики майбутніх пошкоджень. Післяпожежне відновлення має бути спрямоване не на точне відтворення минулої структури, а на формування насадження, здатного функціонувати за очікуваних кліматичних умов [14–18].

Під час планування відновлення важливо зберігати окремі елементи пошкодженого лісу, які підтримують природні процеси. Частина мертвої деревини може захищати ґрунт від ерозії, затримувати вологу, створювати мікросередовища для поновлення та забезпечувати існування лісових організмів. Інтенсивність санітарних і лісовідновних заходів має визначатися з урахуванням ризику повторного горіння, поширення шкідників, безпеки проведення робіт і природоохоронної цінності території [11, 15, 18].

Регіональна диференціація адаптаційних заходів має ґрунтуватися на природних, лісорослинних, екологічних і безпекових характеристиках території. Під час їх вибору необхідно враховувати природну зону, тип лісорослинних умов, породний склад, водний режим, рельєф, локальну пожежну небезпеку та безпекову доступність території. Важливим є також регулярне оцінювання результативності прийнятих рішень. За зміни кліматичних прогнозів, стану насаджень або рівня пожежної небезпеки способи управління мають коригуватися. Саме така послідовність – оцінювання, планування, упровадження, моніторинг і коригування – відповідає принципам адаптивного лісоуправління.

Таблиця 1

Ключові чинники пожежної вразливості лісових екосистем України, адаптаційні заходи та очікувані результати

Чинник або ризик	Основні наслідки	Адаптаційні заходи	Очікуваний результат
Підвищення температури та посилення посух	Водний стрес, зменшення приросту, ослаблення та всихання дерев	Добір стійких місцевих порід і походжень, регулювання густоти, формування змішаних насаджень	Підвищення посухостійкості та життєздатності лісів
Однорідність деревостанів	Одночасне пошкодження пожежами, шкідниками та хворобами	Формування різновікових і структурно різноманітних насаджень	Зниження вразливості до комплексних порушень
Накопичення горючих матеріалів	Зростання інтенсивності та швидкості поширення пожеж	Диференційоване управління горючими матеріалами, підтримання протипожежної інфраструктури	Зменшення ризику масштабного поширення вогню
Несвоєчасне виявлення пожеж	Збільшення площі пошкодження та часу реагування	Супутниковий, геоінформаційний і наземний моніторинг	Раннє виявлення пожеж і точніше оцінювання ризиків
Післяпожежна деградація	Ерозія, втрата біорізноманіття, порушення природного поновлення	Поєднання природного поновлення, обґрунтованого садіння та захисту ґрунтів	Відновлення структури й екосистемних функцій лісу
Воєнні дії та мінування територій	Обмеження доступу, моніторингу, профілактики та гасіння пожеж	Дистанційне оцінювання, картування небезпечних територій, координація з протимінною діяльністю	Підвищення безпеки управління та відновлення пошкоджених лісів

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

На основі аналізу сучасних українських і зарубіжних досліджень [1, 6, 7, 10, 11, 13–18] систематизовано основні напрями підвищення стійкості лісових екосистем України до кліматичних змін і пожежних ризиків, відповідні заходи та очікувані результати їх застосування (табл. 1).

Головні висновки. Зростання ризику виникнення та поширення лісових пожеж в Україні є наслідком взаємодії кліматичних, біотичних, антропогенних і воєнних чинників. Підвищення температури, тривалі посухи та дефіцит ґрунтової вологи спричиняють ослаблення деревостанів, посилення біотичних пошкоджень, накопичення сухостою й висушування лісових горючих матеріалів, що підвищує ймовірність переходу локальних загорянь у масштабні пожежі. Воєнні дії, мінування територій, наявність нерозірваних боєприпасів і пошкодження лісової інфраструктури додатково обмежують можливості профілактики, моніторингу та своєчасного гасіння пожеж.

Систематизовано чотири взаємопов'язані напрями адаптації лісових екосистем: запобігання пожежам і диференційоване управління горючими матеріалами; підвищення видової, вікової та структурної стійкості насаджень; удосконалення моніторингу й прогнозування пожежних ризиків; кліматично орієнтоване післяпожежне відновлення. Встановлено, що ефективність цих заходів залежить від їх комплексного застосування в межах послідовного циклу адаптивного лісоуправління, який охоплює оцінювання вразливості, планування, упровадження, моніторинг результатів і коригування управлінських рішень.

Вибір конкретних адаптаційних заходів має здійснюватися з урахуванням природної зони, типу лісорослинних умов, породного складу та структури насаджень, водного режиму, стану ґрунтів, інтенсивності пошкодження, потенціалу природного поновлення і безпекової доступності території. Такий підхід дає змогу поєднати короткострокове зниження пожежної небезпеки з довгостроковим збереженням стійкості та основних екосистемних функцій лісів.

Перспективи використання результатів дослідження. Матеріали статті можуть бути використані під час підготовки регіональних планів адаптації, оцінювання пожежної небезпеки та планування відновлення пошкоджених лісів. Подальші дослідження доцільно спрямувати на перевірку ефективності запропонованих заходів у різних природних зонах України.

Література

1. Чорнобров О. Ю. Оцінювання екологічного впливу змін клімату на лісові екосистеми. Агроекологічний журнал. 2025. № 4. С. 47–56. DOI: https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2025.345428.
2. Скляр В. Г., Шерстюк М. Ю., Шепелюк М. О., Ковальчук Н. В., Матюха Д. В. Вплив глобальних змін клімату на біологічні характеристики деревних видів у лісових екосистемах. Український журнал лісівництва та деревинознавства. 2025. Т. 16, № 1. С. 44–63. DOI: https://doi.org/10.31548/forest/1.2025.44.
3. Vacek Z., Vacek S., Cukor J. European forests under global climate change: Review of tree growth processes, crises and management strategies. Journal of Environmental Management. 2023. Vol. 332. Art. 117353. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117353.
4. Impacts on and damage to European forests from the 2018–2022 heat and drought events / F. Knutzen et al. Natural Hazards and Earth System Sciences. 2025. Vol. 25. P. 77–117. DOI: https://doi.org/10.5194/nhess-25-77-2025.
5. Хрик В. М., Ситник О. С., Кімейчук І. В., Лозінська Т. П., Масальський В. П. Прогнозування розвитку збудників хвороб і шкідників на підставі кліматичних змін. Лісівництво і агролісомеліорація. 2024. Вип. 145. С. 134–142. DOI: https://doi.org/10.33220/1026-3365.145.2024.134.
6. Abatzoglou J. T., Kolden C. A., Cullen A. C., Sadegh M., Williams E. L., Turco M., Jones M. W. Climate change has increased the odds of extreme regional forest fire years globally. Nature Communications. 2025. Vol. 16. Art. 6390. DOI: https://doi.org/10.1038/s41467-025-61608-1.
7. Сошенський О. М., Миронюк В. В., Зібцев С. В., Гуменюк В. В., де Мігель Діас Ф., Василишин Р. Д. Картування зон взаємодії між природними ландшафтами та населеними пунктами Житомирської області для зниження ризиків лісових пожеж. Український журнал лісівництва та деревинознавства. 2024. Т. 15, № 2. С. 23–40. DOI: https://doi.org/10.31548/forest/2.2024.23.
8. Мороз В. Аналіз та прогнозування масштабів та наслідків впливу лісових пожеж на екосистеми України. Український журнал лісівництва та деревинознавства. 2024. Т. 15, № 3. С. 43–60. DOI: https://doi.org/10.31548/forest/3.2024.43.
9. Пацева І. Г., Барабаш О. В., Мельник-Шамрай В. В., Пацев І. С. Екологічна оцінка впливу пожеж у природних екосистемах на стан екологічної безпеки Житомирської області. Проблеми хімії та сталого розвитку. 2023. № 3. С. 59–65. DOI: https://doi.org/10.32782/pcsd-2023-3-8.
10. Скляр В. Г., Капінос Н. О., Шерстюк М. Ю., Кунцевський Д. В., Ковальчук Н. В. Вплив лісових пожеж на лісові екосистеми. Український журнал лісівництва та деревинознавства. 2025. Т. 16, № 2. С. 99–114. DOI: https://doi.org/10.31548/forest/2.2025.99.
11. Пірогенна трансформація сосняків України : монографія / В. П. Ворон та ін. Харків : ТОВ «Планета-Прінт», 2021. 286 с.
12. Зібцев С. В., Пастернак В. П., Василишин Р. Д., Миронюк В. В., Сидоренко С. Г., Сошенський О. М. Оцінка викидів вуглецю від ландшафтних пожеж в Україні за період війни у 2022 році. Український журнал лісівництва та деревинознавства. 2024. Т. 15, № 1. С. 126–139. DOI: https://doi.org/10.31548/forest/1.2024.126.
13. Кузик А. Д., Товарянський В. І. Вплив воєнних дій на лісові екосистеми України та їх післявоєнне відновлення. Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. 2023. № 27. С. 16–22. DOI: https://doi.org/10.32447/20784643.27.2023.02.

14. Poliakova L., Abruscato S. Підтримка відновлення і сталого управління лісами України й лісовим сектором України : підсумковий звіт. Бонн : FOREST EUROPE, 2023. 50 с. URL: https://foresteurope.org/wp-content/uploads/2023/07/UA-Supporting-the-recoveryз-and-sustainable-management-of-Ukrainian-forests-and-Ukraines-forest-sector.pdf (дата звернення: 13.07.2026).
15. Букша І. Ф. Стан оцінювання загроз та адаптаційних заходів у лісовому господарстві України у зв'язку зі зміною клімату. Forest Policy Report SFI/2022. Київ, 2022. 38 с. URL: https://www.sfi-ukraine.org.ua/wp-content/uploads/2023/11/buksha_climate-change_report_31-01-2022-ukr.pdf (дата звернення: 13.07.2026).
16. Мельник-Шамрай В. В., Шамрай В. І., Краснов В. П., Можарівська І. А., Іванюк Р. О., Весельський О. О. Екологічна безпека лісових екосистем в умовах невизначеності. Екологічні науки. 2025. № 3(60). С. 124–132. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.3-60.23.
17. Forzieri G., Jactel H., Bianchi A., Spinoni J., Somasundaram D., Feyen L., Cescatti A. Ecosystem heterogeneity is key to limiting the increasing climate-driven risks to European forests. One Earth. 2024. Vol. 7, No. 12. P. 2149–2164. DOI: https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.10.005.
18. Jones G. M., Keyser A. R., Westerling A. L., Baldwin W. J., Keane J. J., Sawyer S. C., Clare J. D., Gutiérrez R. J., Peery M. Z. Forest restoration limits megafires and supports species conservation under climate change. Frontiers in Ecology and the Environment. 2022. Vol. 20, No. 4. P. 210–216. DOI: https://doi.org/10.1002/fee.2450.
19. Пацев І. С., Барабаш О. В., Пацева І. Г. Вплив воєнних дій на лісові екосистеми Житомирщини. Екологічні науки. 2023. № 5(50). С. 114–118. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.5-50.16
20. Герасимчук Д. О., Герасимчук Л. О., Валерко Р. А., Пацев І. С., Кириленко Н. П. Екологічні ризики лісових пожеж в Україні з урахуванням кліматичних, антропогенних та воєнних детермінантів. Екологічні науки. 2025. № 6(63). С. 216–220. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.6-63.34
21. Герасимчук Л. О., Валерко Р. А., Пацева І. Г., Пацев І. С. Лісові пожежі у фокусі кластерного аналізу: екосистемні та технологічні аспекти через призму VOSviewer. Український журнал природничих наук. 2025. № 11. С. 270–279. DOI: https://doi.org/10.32782/naturaljournal.11.2025.29

Дата першого надходження статті до видання: 16.07.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

УДК 581.524:630(477.41)
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.34

БІОПРОДУКТИВНІСТЬ ТА ДЕПОНУВАННЯ ВУГЛЕЦЮ СОСНОВИМИ НАСАДЖЕННЯМИ КИЇВЩИНИ

Фіцайло Т.В. (orcid.org/0009-0005-6534-8483),
Тимченко І.А. (orcid.org/ 0000-0001-7505-3164)
Інститут ботаніки імені М.Г. Холодного Національної академії наук України
вул. Терещенківська, 2, 01601, м. Київ
tfitsailo@gmail.com, itymorchid@ukr.net

Соснові насадження Київщини є важливим компонентом лісових екосистем регіону, що забезпечує накопичення органічної речовини, депонування вуглецю, а також регулює водний і енергетичний обмін та підтримує екологічну стійкість. Метою роботи було оцінити біопродуктивність та енергетичний потенціал соснових насаджень Київщини, визначити запаси карбону та охарактеризувати їхній екологічний простір. Дослідження проведено на 200 ділянках соснових лісів Київщини загальною площею 679,1 га. Для кожної ділянки узагальнено запаси деревини, біомасу стовбурів, енергію окремих компонентів фітомаси, приріст, енергію підстилки, чагарникового та трав'яного ярусів, а також енергетичний еквівалент фітомаси екосистеми. Встановлено значну просторову диференціацію продуктивності соснових насаджень. Сумарний запас деревини на досліджених виділах становить 189 634,53 м³, а середній запас у перерахунку на одиницю площі – 269,5 м³/га. Сумарна біомаса стовбурів становить 75 853,81 т, енергія стовбурної біомаси – 1 365 368,62 ГДж, а інтегральна енергія врахованої фітомаси екосистем – 2 426 959,06 ГДж. За прийнятим енергетичним еквівалентом це відповідає приблизно 67,87 тис. т карбону у сукупній сухій фітомасі досліджених виділів. Основну частину енергетичного потенціалу формують деревний ярус і підстилка, що визначає одночасно високу карбонову ємність та потенційну пожежну вразливість окремих лісових масивів. Екологічний аналіз показав, що найбільшу амплітуду серед досліджених факторів мають кислотність ґрунту та вміст мінерального азоту, далі – сольовий режим, вміст карбонатів, гумідність клімату та континентальність. Моделювання зміщення екологічних амплітуд за сценаріями підвищення температури на 1–3 °С засвідчило ризик скорочення екологічної ніші за вологістю ґрунту, аерацією, сольовим режимом і вмістом мінерального азоту; за +3 °С аналогічна тенденція посилюється для гумідності клімату. Отримані результати можуть бути використані для формування регіональної системи моніторингу вуглецевої ємності, пожежної вразливості та пріоритетів збереження соснових екосистем Київщини. *Ключові слова: Pinus sylvestris*, соснові ліси, біомаса, біопродуктивність, депонування вуглецю, енергетичний потенціал, синфітоіндикація, екологічні фактори, кліматичні зміни, Київщина.

Bioproductivity and carbon sequestration by pine stands of Kyiv region. Fitsailo T., Tymchenko I.
Pine stands of the Kyiv region are an essential component of the region's forest ecosystems, ensuring the accumulation of organic matter and carbon sequestration, while also regulating water and energy exchange and maintaining ecological stability. The aim of this study was to assess the bioproductivity and energy potential of pine stands in the Kyiv region, determine carbon stocks, and characterize their ecological space. The study was conducted across 200 plots of pine forests in the Kyiv region with a total area of 679.1 ha. For each plot, wood stocks, stem biomass, the energy content of individual phytomass components, biomass increment, litter energy, shrub and herb-layer energy, as well as the energy equivalent of ecosystem phytomass were summarized. A significant spatial differentiation in the productivity of pine stands was established. The total wood stock of the studied stands amounted to 189,634.53 m³, with a mean stock per unit area of 269.5 m³/ha. Total stem biomass reached 75,853.81 t, stem biomass energy equaled 1,365,368.62 GJ, and the total energy equivalent of the accounted ecosystem phytomass was 2,426,959.06 GJ. Based on the accepted energy equivalent, this corresponds to approximately 67.87 thousand tonnes of carbon in the total dry phytomass of the studied stands. The tree layer and litter form the major part of the energy potential, which simultaneously determines a high carbon storage capacity and potential fire vulnerability in certain forest areas. Ecological analysis showed that soil acidity and mineral nitrogen content exhibit the widest amplitudes among the factors studied, followed by salt regime, carbonate content, climatic humidity, and continentality. Modelling of shifts in ecological amplitudes under scenarios of a 1–3 °C temperature increase revealed a risk of ecological niche contraction regarding soil moisture, aeration, salt regime, and mineral nitrogen content; under a +3 °C warming scenario, a similar trend intensifies for climatic humidity. The obtained results can be used to establish a regional monitoring system for carbon storage capacity, fire vulnerability, and conservation priorities of pine ecosystems in the Kyiv region. *Key words: Pinus sylvestris*, pine forests, biomass, bioproductivity, carbon sequestration, energy potential, synphytoindication, environmental factors, climate change, Kyiv region.

Постановка проблеми. Соснові ліси є базовим компонентно-функціональним елементом екомережі Центрального Полісся та Лісостепу України, забезпечуючи підтримання екологічного балансу та надання критично важливих екосистемних послуг [9]. Насадження *Pinus sylvestris* L. відіграють провідну роль у регіональному вуглецевому циклі як накопичувачі органічного вуглецю та депо CO_2[5, 11], регулюючи водний режим і є осередком збереження фіторізноманіття.

© Фіцайло Т.В., Тимченко І.А., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Оцінка біопродуктивності та просторово-часової динаміки пулів вуглецю соснових екосистем має як теоретичне значення для розуміння біогеохімічних колообігів, так і прикладне – для ведення національного кадастру парникових газів і виконання зобов'язань України в межах Паризької угоди та концепції переходу до кліматично нейтральної економіки [11].

Актуальність дослідження. Актуальність дослідження зумовлена сучасними кліматичними змінами та антропогенними факторами, зокрема наслідками воєнних дій (пожежі, механічні пошкодження ґрунтів), які зменшують запаси лісової біомаси та послаблюють карбондепонувальну здатність екосистем.

Лісові екосистеми є одним із найбільш вагомих природних депо вуглецю. Для Київської області встановлено значні запаси органічного вуглецю в рослинній біомасі лісів, причому соснові насадження формують близько 60 % регіонального запасу вуглецю рослинної біомаси [20]. Отже, оцінювання локальної просторової варіабельності біопродуктивності сосняків необхідне для переходу від регіональних узагальнень до оцінки екосистемної стійкості окремих типів лісорослинних умов.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Робота виконано в рамках науково–дослідної роботи «Розроблення і використання методології і алгоритмів оцінки впливу військових дій на різноманіття природних екосистем України для визначення їхніх втрат для відновлення та адаптивного потенціалу».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для соснових насаджень Київщини вже розроблено залежності для оцінювання фітомаси та поглинання вуглецю, що підтверджує значний регіональний потенціал *Pinus sylvestris* як вуглецевого депо [15]. Сучасні дослідження також показують, що біомаса соснових деревостанів істотно залежить від віку, запасу, базальної площі та інших структурних характеристик деревостану [12]. Оцінювання вуглецевого балансу соснових екосистем потребує врахування не лише деревного ярусу, а й підліску, трав'яного покриву та детриту [18, 19]. На загальнодержавному рівні просторове моделювання лісового вуглецевого балансу України демонструє важливість регіональної диференціації запасів і потоків вуглецю [22].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. У наявних дослідженнях біопродуктивності соснових насаджень Київщини переважно оцінювали біомасу та вуглецеві запаси, тоді як зв'язок цих показників з екологічними характеристиками угруповань залишається недостатньо дослідженим. Особливо важливим є визначення того, які саме едафічні та кліматичні фактори можуть обмежувати стійкість соснових екосистем за подальшого потепління.

Новизна. У роботі вперше для дослідженого масиву соснових насаджень одночасно оцінено запаси деревини, біомаси, енергетичного потенціалу та синфітоіндикаційна характеристика екотопів соснових насаджень Київщини. Вперше для досліджуваного масиву в єдиній системі проаналізовано просторову варіабельність енергетичних показників та зміну екологічного простору соснових фітоценозів за сценаріїв потепління на 1, 2 та 3 °C.

Методологічне та загальнонаукове значення. Запропонований підхід дозволяє розглядати біопродуктивність не лише як ресурсну характеристику деревостану, а як один із інтегральних показників функціонування екосистеми. Поєднання енергетичних та синфітоіндикаційних характеристик дозволило зіставити продукційні параметри соснових насаджень з екологічними умовами їхнього існування.

Матеріали та методи. Дослідження проведено на основі попередніх польових досліджень, літературних даних, таксаційних описів (200 ділянок загальною площею 679,1 га) в межах приміської зеленої зони м. Києва (Лісопаркового господарського поясу), що охоплює соснові та дубово-соснові масиви Правобережного Полісся (Пуща-Водиця), Лівобережного Полісся та Броварсько-Дарницького піщаного ареалу (Броварське та Дарницьке лісництва), а також Дніпровської заплавно-терасової системи (Конча-Заспа).

Біопродуктивність оцінювали за запасом деревини та показниками фітомаси окремих компонентів деревостану. Оцінку базових показників та їхніх співвідношень здійснювали за даними про діаметр, висоту, вік дерев, об'єм і щільність деревини [7]. Визначено залежності запасів біомаси від віку, висоти та діаметра домінуючої породи. На основі отриманих показників (вік-запас, висота-запас, діаметр-запас) розраховували середнє значення запасу ($м^3$/га). Проводився обрахунок біомаси складових екосистем за відомими співвідношеннями між показниками стовбурної деревини (63%), гілок (13%), хвої (4%) та підземної частини (20%), а також загальної надземної біомаси деревостану [4-6, 14].

Геоботанічні дослідження виконано із застосуванням еколого-флористичних критеріїв опису рослинних угруповань [8, 21]. Екологічну характеристику угруповань подано на основі розрахунку фітоіндикаційних показників провідних екологічних факторів за відповідними шкалами Я.П. Дідуха та П.Г. Плюти [3, 10]. Розрахунок прогностичних даних можливої втрати оселищ виконано на основі методики Я.П. Дідуха [1, 2].

Викладення основного матеріалу. Псамофітні соснові та дубово-соснові ліси, приурочені до другої (акумулятивної) тераси р. Дніпро, сформовані на дерново-слабо- та середньопідзолистих піщаних і супіщаних ґрунтах різного ступеня зволоження. Досліджені соснові угруповання належать до класів **Vaccinio-Piceetea** Br. -Bl. in Br. -Bl. et al. 1939 (*Dicrano-Pinetum* Preising et Knapp ex Oberd. 1957, *Peucedano-Pinetum* Matuszkiewicz (1962) 1973,

Veronico incanae-Pinetum Bulokhov et Solomeshch 2003) та **Pyrolo-Pinetea sylvestris** Korneck 1974 (*Potentillo arenariae-Pinetum sylvestris* Ermakov 1999), що відображає поєднання бореальних і термофільно-ксеромезофільних рис рослинності. Їхня флористична та екологічна диференціація пов'язана з мозаїчністю піщаних терасових екотопів Дніпра, що зумовлює широкий спектр умов зволоження, трофності та термічного режиму.

Біопродуктивність та енергетичні характеристики. Сумарний запас деревини на 200 ділянках загальною площею 679,1 га становить 189 634,53 м³, а біомаса стовбурів – 75 853,81 т (Табл. 1). Запас, нормований на площу, варіює від 15,49 до 11 102,00 м³/га (у перерахунку на максимальні виділи), при середньому значенні 269,5 м³/га та медіані 260,0 м³/га. Широкий діапазон запасу відображає неоднорідність досліджених деревостанів за віком, повнотою та умовами місцезростання.

Енергія стовбурної біомаси досягає 1 365 368,62 ГДж, тоді як енергетичний еквівалент біомаси деревостану становить 2 167 251,77 ГДж, а надземної біомаси деревостану – 2 709 064,71 ГДж. Енергія приросту біомаси деревостану для всієї вибірки становить 65 017,55 ГДж. Сумарна енергія фітомаси екосистеми для 200 виділів становить 2 426 959,06 ГДж. За прийнятим співвідношенням 35,76 ГДж на 1 т карбону це відповідає приблизно 67 868 т С у сукупній фітомасі досліджених виділів. Порівняння з дослідженнями соснових лісів Лівобережного Лісостепу показує, що карбоновий потенціал соснових насаджень суттєво залежить від віку та умов місцезростання [16, 17]. У модальних соснових деревостанах максимальна середньорічна зміна запасу карбону спостерігається у молодших і середньовікових насадженнях, тоді як абсолютний запас карбону продовжує накопичуватися з віком [17]. Енергія підстилки сумарно становить 243815,82 ГДж. Найвищі її запаси спостерігаються на ділянках стиглого лісу – 14168,57 ГДж, що свідчить про значний детритний компонент екосистеми.

Екологічна характеристика соснових біотопів. Для фітоценозів досліджуваних соснових лісів розраховані значення 12 екологічних факторів: вологість ґрунту, змінність зволоження ґрунту, аерація ґрунту, загальний сольовий режим ґрунту, або трофність, кислотність ґрунту, уміст мінерального азоту та карбонатів у ґрунті, терморежим, континентальність, кріорежим, гумідність, освітленість. За діапазоном фактичних значень найбільшою варіабельністю характеризуються кислотність ґрунту (5,25–7,33) та вміст мінерального азоту (3,89–5,94). Значними також є амплітуди сольового режиму (5,57–6,98), вмісту карбонатів (5,57–6,98), гумідності клімату (11,85–13,36) та континентальності (7,64–9,12). Екотопи цих лісів знаходяться в умовах від суховатих лучно–степових до свіжих лісо–лучних ділянок з помірним промочуванням коренемісного шару грунту, з кислотністю pH 5,5–6,6. За сольовим режимом ці ділянки займають багаті на солі грунти (95–150 мл/л), за вмістом карбонатів досліджувані соснові ліси або не зростають на карбонатних грунтах, або з незначним вмістом карбонатів. Також ці сухі піщані екотопи бідні (0,05–0,3%) на вміст мінерального азоту в грунті. За терморежимом ценози соснових лісів відповідають суббореальному типу (35-39 ккал·см$^{-2}$·рік$^{-1}$). Континентальність клімату має різко континентальний характер (126-140%). Амплітуда гумідності клімату або омброрежиму відповідає субарідофільним умовам. Морозність клімату (кріорежим) для досліджуваних ділянок

Таблиця 1

Біопродуктивність та енергетичні характеристики соснових деревостанів

Показник	на 1 га (середнє)	на 1 га (Min)	на 1 га (Max)	на площу всіх виділів (679,1 га)
Запас деревини, м³	271,41	50,00	1398,01	189634,53
Біомаса стовбурів, м³	108,56	20,00	559,20	75853,81
Енергія стовбурної біомаси, ГДж	1954,13	360,00	10065,64	1365368,62
Енергія біомаси деревостану, ГДж	3101,79	571,43	15977,20	2167251,77
Енергія надземної біомаси деревостану, ГДж	3877,24	714,29	19971,50	2709064,71
Енергія приросту біомаси деревостану, ГДж	93,05	17,14	479,32	65017,55
Енергія підстилки, ГДж	348,95	64,29	1797,44	243815,82
Енергія чагарників та підросту, ГДж	12,65	0,40	118,79	7062,87
Енергія трав'яного ярусу, ГДж	15,82	0,50	148,48	8828,59
Енергія фітомаси екосистеми, ГДж	3479,21	657,60	18041,90	2426959,06
Енергія трофічних ланцюгів, ГДж	10,89	2,93	62,78	7384,61
Енергія CO2, ГДж	70,77	19,05	408,07	47999,99
Енергія O2, ГДж	152,42	41,02	878,92	103384,60
Енергія транспірації, ГДж	21,77	5,86	125,56	14769,23

відповідає субкріофітним умовам – морозність зим з -14 – -10^{0}С.

Прогноз зміни екологічних умов за сценаріями потепління. Підвищення середньорічної температури на 1–3 °С зумовлює перебудову комплексу екологічних факторів, що впливають на функціонування лісових екосистем. За сценарію +1 °С найбільше перекриття прогнозованої та сучасної амплітуд спостерігається для освітленості, кислотності, вмісту карбонатів та змінності зволоження, тоді як вологість ґрунту, його аерація, сольовий режим і вміст мінерального азоту мають лише 41–48 % перекриття. Отже, саме ці фактори можуть першими обмежувати площу екологічно придатних умов для соснових угруповань. За сценарію +2 °С тенденція зберігається: мінімальні значення перекриття припадають на аерацію (40,66 %), кислотність (71,00 % – без загрози), вологість ґрунту (42,39 %), сольовий режим (42,70 %) та мінеральний азот (46,74 %). Зростання температури посилює випаровування і транспіраційні втрати, а на легких піщаних і супіщаних ґрунтах із невисокою водоутримувальною здатністю це може призводити до швидшого висушування кореневмісного шару. За сценарію +3 °С ймовірність переходу від компенсаторних до структурних змін екосистеми істотно зростає. Значення перекриття для гумідності клімату знижується до 49,30 %, тому цей фактор переходить у категорію потенційної загрози скорочення. Для інших факторів перекриття залишається понад 50 %.Для соснових насаджень Київщини це особливо важливо через поєднання піщаних ґрунтів, субарідофільної гумідності та високої пожежної небезпеки. Отримана нами тенденція – зниження перекриття амплітуд за вологістю ґрунту від 44,14 % при +1 °С до 40,72 % при +3 °С, за аерацією – від 41,28 до 40,05 %, а за вмістом мінерального азоту – від 48,18 до 45,35 % – свідчить про поступове посилення обмежувальної ролі цих факторів. Особливо показовою є зміна гумідності клімату: її перекриття зменшується з 51,74 % при +1 °С до 49,30 % при +3 °С, тобто саме за сценарію +3 °С цей фактор переходить через прийнятий у дослідженні 50-відсотковий поріг і потрапляє до категорії потенційної загрози скорочення.

Водночас важливо підкреслити, що вихід окремого екологічного фактора за межі оптимальної амплітуди не означає автоматичного зникнення соснового угруповання. Екосистема є багатофакторною системою, у якій зміна одного параметра може частково компенсуватися змінами інших параметрів, а рослини мають певний діапазон фізіологічної пластичності. Зниження перекриття амплітуд слід трактувати як потенційний ризик скорочення екологічно придатних умов, а не як прогноз фактичного зникнення соснових угруповань.

Головні висновки.

1. Соснові насадження Київщини характеризуються високим біопродуктивним і карбонодепонувальним потенціалом. На 200 досліджених ділянках загальною площею 679,1 га сумарний запас деревини становив 189 634,53 м^3, біомаса стовбурів – 75 853,81 т, енергія стовбурної біомаси – 1 365 368,62 ГДж, а енергетичний еквівалент врахованої фітомаси екосистем – 2 426 959,06 ГДж. Отримані показники підтверджують значення соснових деревостанів не лише як продукційних, а й як регуляторних компонентів лісових екосистем.

2. Біопродуктивність характеризується вираженою просторовою неоднорідністю. Запас деревини в перерахунку на одиницю площі варіює від 15,49 до 1 102,00 м^3/га (у перерахунку на максимальні виділи) при середньому значенні 269,5 м^3/га. Така диференціація є результатом взаємодії вікової та структурної організації деревостанів із ґрунтово-гідрологічними умовами, рельєфом і історією формування лісових масивів.

3. Величина накопиченого карбону безпосередньо пов’язана із запасом органічної речовини деревостанів. За прийнятим співвідношенням 35,76 ГДж на 1 т карбону енергетичний запас врахованої фітомаси відповідає орієнтовно 67 868 т С у сукупній фітомасі досліджених виділів. Водночас цей показник охоплює лише зафіксовану фітомасу, не враховуючи повністю ґрунтовий вуглець, глибокі коріння та деякі інші складові екосистеми. Отже, фактичний екосистемний запас карбону є вищим, а оцінені величини слід розглядати як мінімальну характеристику карбонодепонувальної функції досліджених насаджень.

4. Здатність соснових екосистем накопичувати карбон одночасно визначає їхню вразливість до порушень, зокрема пожеж. Найбільші запаси енергетично ємної органічної речовини підстилки встановлено на ділянках стиглого лісу (70–143 років) – 14 168,57 ГДж (при загальній енергії підстилки по всій вибірці 243 815,82 ГДж). Тому високопродуктивні деревостани мають розглядатися не лише як пріоритетні карбонові депо, а й як об’єкти підвищеної уваги щодо пожежної безпеки.

5. Синфітоіндикаційний аналіз засвідчив переважання сухуватих і свіжих екотопів із суббореальним терморежимом, континентальним характером клімату та відносно низькою гумідністю. Саме поєднання едафічної бідності, високої проникності субстрату та гідротермічного режиму формує специфічну екологічну нішу соснових угруповань.

6. Підвищення температури змінює не лише безпосередньо термічні умови існування соснових угруповань, а й комплекс пов’язаних із ними едафічних та кліматичних факторів. Моделювання показало, що найбільш чутливими компонентами екологічного простору за потепління на 1–2 °С є вологість і аерація ґрунту, сольовий режим та забезпечення мінеральним азотом; за потепління на 3 °С до них додається гумідність клімату. Отже, зі збільшенням температури зростає роль водного режиму ґрунту та

пов'язаних із ним едафічних факторів у формуванні придатності умов для соснових угруповань.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати можуть бути використані для формування регіональної системи моніторингу карбонового потенціалу соснових лісів Київщини. Наступним етапом дослідження може бути просторове екстраполювання отриманих оцінок із використанням даних дистанційного зондування, зокрема NDVI та інших спектральних індексів.

Література

1. Буджак В. В., Дідух Я. П. Синфітоіндикаційна оцінка оселищ рослин Червоної книги України та ризиків їхніх втрат під впливом кліматогенних змін. *Український ботанічний журнал*. 2020. Т. 77, № 6. С. 434–453. DOI: 10.15407/ukrbotj77.06.434.
2. Дідух Я. П. Методологічні підходи до проблем фітоіндикації екологічних факторів. *Український ботанічний журнал*. 1990. Т. 47, № 6. С. 5–12.
3. Дідух Я. П., Плюта П. Г. Фітоіндикація екологічних факторів. Київ: Наукова думка, 1994. 280 с.
4. Дідух Я. П., Расевич В. В., Гаврилов С. О., Альошкіна У. М. Оцінка екологічних збитків екосистем на основі енергетичних показників. *Наука та інновації.* 2009. Т. 5, № 5. С. 62–74.
5. Лакида П. І. Фітомаса лісів України. Тернопіль: Збруч, 2002. 256 с.
6. Методика розрахунку екологічних збитків природних екосистем та їхніх компонентів: посібник / Я. П. Дідух, У. М. Соколенко, В. В. Расевич, С. О. Гаврилов. Львів; Київ: Компанія «Манускрипт», 2024. 68 с.
7. Нормативи оцінки компонентів надземної фітомаси дерев головних лісотвірних порід України. Київ: ЕКОінформ, 2011. 187 с.
8. Продромус рослинності України / Д. В. Дубина, Т. П. Дзюба, С. М. Ємельянова [та ін.]. Київ: Наукова думка, 2019. 784 с.
9. Costanza R., de Groot R., Sutton P. [et al.]. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*. 2014. Vol. 26. P. 152–158.
10. Didukh Ya. P. The ecological scales for the species of Ukrainian flora and their use in synphytoindication. Kyiv: Phytosociocentre, 2011. 176 p.
11. IPCC. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories / E. Calvo Buendia, K. Tanabe, A. Kranjc [et al.] (eds). Japan : IPCC, 2019. URL: iges.or.jp (дата звернення: 30.08.2026).
12. Jagodziński A. M., Dyderski M. K., Gęsikiewicz K. [et al.]. Effects of stand features on aboveground biomass and biomass conversion and expansion factors based on a Pinus sylvestris L. chronosequence in Western Poland. *European Journal of Forest Research*. 2019. Vol. 138. P. 673–683. DOI: 10.1007/s10342-019-01197-z.
13. Lesiv M., Shvidenko A., Schepaschenko D. [et al.]. A spatial assessment of the forest carbon budget for Ukraine. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. 2019*. Vol. 24. P. 985–1006. DOI: 10.1007/s11027-018-9795-y.
14. Moore T. R., Bubier J. L. [et al.]. Plant biomass and production and CO_2 exchange in an ombrotrophic bog. *Journal of Ecology.* 2002. Vol. 90. P. 25–36. DOI: 10.1046/j.0022-0477.2001.00633.x.
15. Moroz V., Nykytiuk Yu. Carbon absorption ability of pine forest plantations in Kyiv Polissya. *Interdepartmental Thematic Scientific Collection of Phytosanitary Safety.* 2019. Iss. 65. P. 133–148. DOI: 10.36495/1606-9773.2019.65.133-148.
16. Pasternak V. P., Pyvovar T. S., Yarotsky V. Yu. Forest carbon stock in Left-bank Forest-Steppe of Ukraine according to intensive forest monitoring data. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine.* 2020. Vol. 20. P. 120–130. DOI: 10.15421/412011.
17. Pasternak V. P., Pyvovar T. S., Garmash A. V. Bioproductivity and carbon stock dynamics of modal pine stands in the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine.* 2025. Vol. 28. P. 149–156. DOI: 10.15421/412512.
18. Rapport D. J., Costanza R., McMichael A. J. Assessing ecosystem health. *Trends in Ecology & Evolution.* 1998. Vol. 13, no. 10. P. 397–402.
19. The carbon balance of a six-year-old Scots pine (Pinus sylvestris L.) ecosystem estimated by different methods. *Forest Ecology and Management.* 2019. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.11.012.
20. Vasylyshyn R., Lakyda I., Melnyk O., Lakyda M., Rymarenko Yu. Organic carbon in the plant biomass of forests in Kyiv region. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science.* 2021. Vol. 12, no. 3. P. 63–71. DOI: 10.31548/forest2021.03.005.
21. Weber H. E., Moravec J., Theurillat J. P. International Code of Phytosociological Nomenclature. 3rd edition. *Journal of Vegetation Science*. 2000. Vol. 11, no. 5. P. 739–768.
22. Zibtsev S., Pasternak V., Vasylyshyn R., Myroniuk V., Sydorenko S. Assessment of carbon emissions due to landscape fires in Ukraine during war in 2022. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science.* 2024. Vol. 15, iss. 1. P. 126–139. DOI: 10.31548/forest/1.2024.126.

Дата першого надходження статті до видання: 01.09.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

УДК 528.8:004.9:630.43(282.247.3)(477.51)
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.35

ДИНАМІКА ВІДНОВЛЕННЯ ЛІСОВИХ ТЕРИТОРІЙ ПОЛІСЬКОЇ ЧАСТИНИ ЧЕРНІГІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ ЗА ПОКАЗНИКАМИ ІНДЕКСУ NDVI (2016–2025 РР.)

Яковенко О.І.[1,2] (orcid.org/0000-0003-1417-6042),
Асмаковський Є.В.[3] (orcid.org/0000-0001-7134-0545)
[1]Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка
вул. Гетьмана Полуботка, 53, 14013, Чернігів
[2]Інститут географії Національної академії наук України
вул. Володимирська, 44, 01030, Київ
[3]Інститут сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва
Національної академії аграрних наук України
вул. Шевченка, 97, 14030, Чернігів
ajakov2@gmail.com, zhekasmakovsk1y@gmail.com

Лісові території поліської частини Чернігівської області зазнають комплексних змін за рахунок впливу антропогенних та природних чинників, серед яких провідну роль відіграють рубки, пожежі різного генезу, а також наслідки повномасштабних бойових дій, що розпочалися у 2022 році. Окрім оцінки масштабів втрат лісового покриву, постає необхідність проведення комплексних досліджень спрямованих на визначення темпів, особливостей та повноти його відновлення. Метою дослідження є кількісна оцінка динаміки відновлення лісового покриву на основі аналізу багаторічних часових рядів нормалізованого різницевого індексу рослинності – NDVI за період 2016–2025 років. Дослідження базується на використанні супутникових знімків Sentinel-2, доступних через платформу Google Earth Engine. Для кожного року спостережень сформовано медіанні літні композити за червень–серпень із застосуванням алгоритмів маскування хмар. Просторовий аналіз і розрахунок середніх значень NDVI у межах полігонів виконано у середовищі QGIS, а статистичну обробку виконано із використанням бібліотек Python. Об'єктами аналізу виступили полігони, на яких зафіксовані втрати лісового покриву у 2001–2024 роках, які включають понад 148000 ділянок після рубок та 8068 ділянок після пожеж. У результаті дослідження встановлено чітку залежність між типом змін, їх давністю та рівнем відновлення лісової рослинності. Встановлено, що ділянки, які зазнали змін у 2001–2010 роках, характеризуються високим показником NDVI із середнім значенням понад 0,74–0,81 одиниць. Території, які зазнали змін у 2011–2015 роках, перебувають на стадії активного відновлення, тоді як ділянки 2016–2021 років характеризуються частковим відновленням. Найбільш критичний стан зафіксовано для територій, що зазнали впливу у 2022–2024 роках, де показник NDVI різко знизився та демонструє повільну динаміку відновлення. Встановлено, що відновлення після рубок відбувається швидше у порівнянні з пожежами, що, ймовірно, пов'язано зі збереженням підліску та меншою трансформацією ґрунтового покриву. Отримані результати дозволяють оцінити сучасний стан лісових екосистем, визначити закономірності розвитку сукцесій після змін та визначити тенденції відновлення лісового покриву. Практичне значення дослідження полягає у можливості використання отриманих результатів для обґрунтування лісовідновлювальних заходів, моніторингу стану лісів та оптимізації природокористування в умовах повномасштабних бойових дій. *Ключові слова:* дистанційне зондування, індекс NDVI, Google Earth Engine, Sentinel-2, динаміка лісової рослинності, Чернігівське та Новгород-Сіверське Полісся.

Dynamics of forest area recovery in the Polissia part of Chernihiv region based on NDVI index values (2016–2025). Yakovenko O., Asmakovskyi Ye.

The forest areas of the Polissia part of the Chernihiv region are undergoing complex changes due to the influence of anthropogenic and natural factors, among which the leading role is played by logging, fires of various origins, as well as the consequences of full-scale hostilities that began in 2022. In addition to assessing the scale of forest cover losses, there is a need to conduct comprehensive studies aimed at determining the pace, features and completeness of its restoration. The purpose of the study is to quantitatively assess the dynamics of forest cover restoration based on the analysis of multi-year time series of the normalized difference vegetation index – NDVI for the period 2016–2025. The study is based on the use of Sentinel-2 satellite images available through the Google Earth Engine platform. For each year of observations, median summer composites for June–August were formed using cloud masking algorithms. Spatial analysis and calculation of average NDVI values within polygons were performed in the QGIS environment, and statistical processing was performed using Python libraries. The objects of analysis were polygons where forest cover losses were recorded in 2001–2024, which include more than 148,000 areas after logging and 8,068 areas after fires. As a result of the study, a clear relationship was established between the type of changes, their duration and the level of forest vegetation restoration. It was found that the areas that underwent changes in 2001–2010 are characterized by a high NDVI index with an average value of more than 0.74–0.81 units. The areas that underwent changes in 2011–2015 are at the stage of active restoration, while the areas of 2016–2021 are characterized by partial restoration. The most critical condition was recorded for the areas that were affected in 2022–2024, where the NDVI index decreased sharply and demonstrates slow restoration dynamics. It was found that recovery after logging occurs faster than after fires,

© Яковенко О.І., Асмаковський Є.В., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

which is probably due to the preservation of the undergrowth and less transformation of the soil cover. The results obtained allow us to assess the current state of forest ecosystems, determine the patterns of succession development after changes, and determine trends in forest cover recovery. The practical significance of the study lies in the possibility of using the results obtained to substantiate forest restoration measures, monitor the state of forests, and optimize environmental management in conditions of full-scale hostilities. *Key words*: remote sensing, NDVI index, Google Earth Engine, Sentinel-2, forest vegetation dynamics, Chernihiv and Novhorod-Siversk Polissia.

Постановка проблеми. З початком широкомасштабних бойових дій на території України у 2022 році особливої актуальності набуло питання моніторингу та аналізу змін лісового покриву, насамперед у прикордонній зоні Чернігівської області.

До 2022 року провідним чинником змін лісового покриву в регіоні була господарська діяльність людини, яка включала лісозаготівлю, меліорацію та розчищення лісових ділянок та трансформацію окремих земель під сільськогосподарське використання. У зв'язку з бойовими діями контроль за використанням лісових ресурсів суттєво ускладнився, зросла несанкціонована лісозаготівля, як місцевим населенням для власних потреб, так і для військових цілей, зокрема для будівництва фортифікаційних споруд.

Крім того, бойові дії зумовили формування додаткових факторів, які впливають на лісові екосистеми, зокрема механічне пошкодження деревостанів внаслідок розривів боєприпасів, інтенсивне пересування військової техніки та облаштування фортифікаційних споруд, локальні пожежі, забруднення та супутню деградацію ґрунтового покриву. Сукупна дія цих факторів змінює структуру лісових насаджень, знижує їх природню стійкість та призводить до зниження екологічних функцій лісових екосистем.

Особливої актуальності набула проблема формування лісових пожеж у поліській частині Чернігівської області, які призводять до масштабних втрат лісових ресурсів, завдаючи значних економічних і екологічних збитків регіону. Унаслідок пожеж відбувається деградація лісових водозборів, порушується гідрологічний режим, стан ґрунтового покриву, знижуються екологічні функції лісів. Починаючи з 2022 року першопричиною виникнення та поширення лісових пожеж, насамперед у прикордонній зоні Чернігівської області є активні бойові дії.

Проведення класичних досліджень у регіоні значно ускладнилися або взагалі стали неможливими з огляду на загрозу для життя і здоров'я людей, мінування територій та їх забруднення вибухонебезпечними предметами, заборону на відвідування лісових територій та запровадженими обмеженнями на польоти, що унеможливлює застосування безпілотних авіаційних систем для здійснення дистанційного моніторингу. У таких умовах особливої актуальності набувають технології дистанційного зондування Землі із застосування супутникових даних для оцінювання стану та динаміки лісових екосистем.

Актуальність дослідження. Актуальність дослідження зумовлена значними втратами лісового покриву поліської частини Чернігівської області та недостатнім рівнем його відновлення. В умовах обмеженого або взагалі відсутнього доступу до цих територій особливого значення набувають методи дистанційного зондування Землі, зокрема використання індексу NDVI на основі супутникових даних Sentinel-2 у поєднанні з інформацією про роки змін лісового покриву [1], отриманою з ресурсу Global Forest Watch [2]. Це дозволяє здійснювати кількісну оцінку стану та динаміки відновлення лісової рослинності, виявляти осередки, першопричини, кількісні показники з подальшим прогнозуванням трансформації лісових екосистем регіону, що в свою чергу є необхідним елементом для прийняття обґрунтованих управлінських рішень у сфері лісового господарства.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Проведені дослідження мають суттєве значення для реалізації національних і регіональних завдань щодо збереження лісів в Україні. Вони узгоджуються з положеннями Указів Президента України № 381/2017 «Про додаткові заходи щодо розвитку лісового господарства, раціонального природокористування та збереження об'єктів природно-заповідного фонду», № 511/2019 «Про деякі заходи щодо збереження лісів та раціонального використання лісових ресурсів», № 722/2019 «Про цілі сталого розвитку України на період до 2030 року» та «Програма охорони навколишнього природного середовища Чернігівської області на 2021-2027 роки». Крім того, результати досліджень відповідають вимогам Директиви 92/43/ЄЕС та Стратегії ЄС щодо біорізноманіття до 2030 року, зокрема в частині збереження рідкісних природних оселищ, підвищення ефективності екосистемного моніторингу лісової рослинності та обґрунтування заходів з відновлення лісів у повоєнний період.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження, присвячені оцінці стану лісових екосистем все більше базуються на застосуванні методів дистанційного зондування Землі, геоінформаційних систем та аналізу часових рядів супутникових даних. Застосування даних супутникових платформ Landsat і Sentinel-2 дає змогу виявляти та класифікувати зміни лісового покриву, визначати масштаби лісових пожеж, рубок, осередків деградації, а також оцінювати динаміку відновлення лісового покриву.

Значна кількість досліджень присвячена розробленню методів аналізу часових рядів вегетаційних

індексів, насамперед NDVI. Встановлено, що аналіз багаторічної динаміки NDVI є ефективним інструментом виявлення змін у лісовому покриві, оцінці швидкості відновлення після пожеж та виокремлення довгострокових тенденцій формування рослинного покриву від міжрічної мінливості [4; 5]. Також досить широко застосовуються алгоритми часової диференціації супутникових даних, зокрема LandTrendr, які забезпечують автоматизоване визначення часу виникнення змін лісового покриву та тривалості процесів його відновлення [6].

Окремий напрям сучасних досліджень пов'язаний із використанням супутникових даних Sentinel-2 для картографування змін лісового покриву та оцінювання наслідків лісових пожеж. Опрацювання супутникових знімків в автоматичному режимі забезпечує високу точність виявлення змін лісового покриву [7; 8]. Подальший розвиток цього напряму пов'язаний з інтеграцією даних Sentinel-2 у поєднанні з застосуванням безпілотних літальних апаратів для виконання аерофотознімання, що дозволяє суттєво підвищити точність оцінки стану лісового покриву і картографування деградованих територій [9].

Оцінка достовірності глобальних баз даних щодо змін лісового покриву також є важливим напрямом сучасних геоінформаційних досліджень. Доведено доцільність використання даних дистанційного зондування різної просторової роздільності для підвищення точності визначення втрат лісів, класифікації типів змін і оцінювання динаміки лісових екосистем [10; 11]. Поєднання часових рядів Landsat із даними LiDAR розширює можливості оцінювання змін біомаси та процесів відновлення лісів після деградаційних процесів [12]. Особлива увага також приділена дослідженню відновлення лісових екосистем після пожеж та впливу екстремальних кліматичних явищ на швидкість та повноту їх відновлення [13].

В Україні питання застосування дистанційного зондування Землі та геоінформаційних технологій для моніторингу лісових екосистем висвітлено у низці праць [14-25]. У зазначених роботах досліджено можливості використання часових рядів NDVI для оцінювання стану лісової рослинності, розроблено підходи до класифікації лісового покриву за супутниковими даними, доведено ефективність застосування ГІС для моніторингу лісових екосистем, а також висвітлено особливості дистанційного оцінювання наслідків природних пожеж і поширення осередків деградації лісових територій.

Після початку повномасштабних бойових дій особливої актуальності набули дослідження, спрямовані на оцінювання впливу військового фактору впливу на природні екосистеми. Зокрема, для Харківської області виконано супутниковий аналіз деградації природніх екосистем внаслідок воєнних дій [26], а також досліджено масштаби лісових пожеж у прикордонних районах Чернігівської області та їхній потенційний вплив на природно-заповідний фонд регіону [27]. Разом із тим наявні дослідження переважно мають локальний характер або охоплюють окремі часові проміжки, що не дає змогу здійснити комплексну оцінку довготривалої динаміки рослинного покриву на територіях, які зазнали впливу від бойових дій.

Отже, незважаючи на значну кількість досліджень щодо використання дистанційного зондування Землі та геоінформаційних технологій у моніторингу лісових екосистем, недостатньо вивченими залишаються питання комплексного аналізу багаторічної динаміки NDVI на територіях, що зазнали впливу бойових дій, зокрема у прикордонній зоні Чернігівської області. Це обумовлює необхідність удосконалення підходів для оцінки просторово-часових змін лісового покриву регіону із застосуванням сучасних методів дистанційного зондування Землі та геоінформаційних технологій.

Виділення невирішених частин загальної проблеми. Незважаючи на наявність загальних оцінок втрат і відновлення лісового покриву, залишаються невирішеними такі аспекти:

1) відсутність детального аналізу швидкості та повноти відновлення рослинності на рівні окремих ділянок на різних стадіях сукцесійних змін;

2) вплив типу втрат лісового покриву (рубки чи пожежі) на динаміку показника NDVI та процеси відновлення лісової рослинності;

3) роль природних умов, зокрема едафічних особливостей і типів лісових угруповань у процесах відновлення лісового покриву;

4) особливості відновлення лісових територій, деградованих унаслідок повномасштабних бойових дій.

Наукова новизна. Уперше для поліської частини Чернігівської області здійснено комплексний аналіз динаміки відновлення лісової рослинності на основі аналізу ділянок, що зазнали змін протягом 2001–2024 років, за часовими рядами NDVI Sentinel-2 у період 2016–2025 років. Встановлено закономірності зміни показника залежно від типу втрат лісового покриву (рубки, пожежі), часу їх виникнення та природних умов. Виявлено відмінності у швидкості відновлення між різними типами змін, а також визначено особливості відновлення територій, зміни на яких відбувалися в умовах повномасштабних бойових дій.

Методологічне значення. Методологічне значення дослідження полягає у застосуванні інтегрованого підходу, що поєднує використання відкритих супутникових даних Sentinel-2, геоінформаційної платформи Google Earth Engine, Global Forest Watch та ГІС-аналізу у середовищі QGIS [1; 2; 3; 28]. Запропонована методика є відтворюваною та придатною для масштабного моніторингу лісових екосистем, особливо в умовах обмеженого доступу до територій в умовах повномасштабних бойових дій.

Вона також може бути використана для аналізу динаміки рослинності в інших регіонах після деградаційних змін різного генезу.

Матеріали та методи. Основою проведеного дослідження стало поєднання ряду незалежних джерел даних, а саме: часових рядів NDVI, розрахованих за супутниковими знімками Sentinel-2 Surface Reflectance (COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED), доступними через платформу Google Earth Engine за період 2016–2025 рр; тематичних растрових шарів змін лісового покриву, отриманих з платформи Global Forest Watch (на основі набору даних Global Forest Change) [29], які містять інформацію про рік втрати лісового покриву починаючи з 2001 р., а також растровий шар втрат лісового покриву внаслідок пожеж за 2001–2024 рр. (https://glad.umd.edu/users/Alexandra/Fire_GFL_data/2001-24/) [30].

Рік втрати лісового покриву використовувався як часовий атрибут для групування полігонів, тоді як значення NDVI розраховувалися виключно за знімками Sentinel-2 у межах періоду 2016–2025 рр. Дане поєднання дало змогу оцінити сучасний стан лісової рослинності на ділянках, що зазнали змін у різні роки.

Індекс NDVI розраховувався на основі відбиття поверхнею випромінювання у червоному та ближньому інфрачервоному спектральних діапазонах за формулою:

$$NDVI = (NIR – RED) / (NIR + RED) = (B8 – B4) / (B8 + B4),$$

де B8 – ближній інфрачервоний канал (842 нм), B4 – червоний канал (665 нм); просторова роздільна здатність – 10 м. Значення індексу змінюються в межах від –1 до +1: від'ємні значення відповідають водним поверхням, льоду або снігу, значення, близькі до нуля, – відкритим ґрунтам і хмарам, а високі значення характеризують густу здорову рослинність (Рис. 1.).

Для кожного з 9 календарних років спостережень (2016, 2017, 2019–2025) формувалася медіанна композиція знімків за літній вегетаційний сезон (червень–серпень) з маскуванням хмар і хмарних тіней за алгоритмом s2cloudless (порогове значення ймовірності хмарності – 45 %) та маскуванням крайових артефактів сцени за каналами B8A і B9. 2018 рік виключено з аналізу через недостатнє покриття чистими пікселями в архіві Sentinel-2 для досліджуваної території.

Об'єктами аналізу слугували векторні набори полігонів, отримані авторами шляхом векторизації в середовищі QGIS растрових шарів, завантажених з платформи Global Forest Watch та з ресурсу https://glad.umd.edu:

– полігони пожеж (8068 ділянок) з інформацією про площу та просторове розташування ділянок вигоряння за 2001–2024 рр.;

– полігони рубок (понад 148 000 ділянок) з інформацією про площі та роки проведення рубок за той самий період.

Кожен полігон містив атрибут «рік втрати лісового покриву» (від 1 до 24, де 1 відповідає 2001 р.,

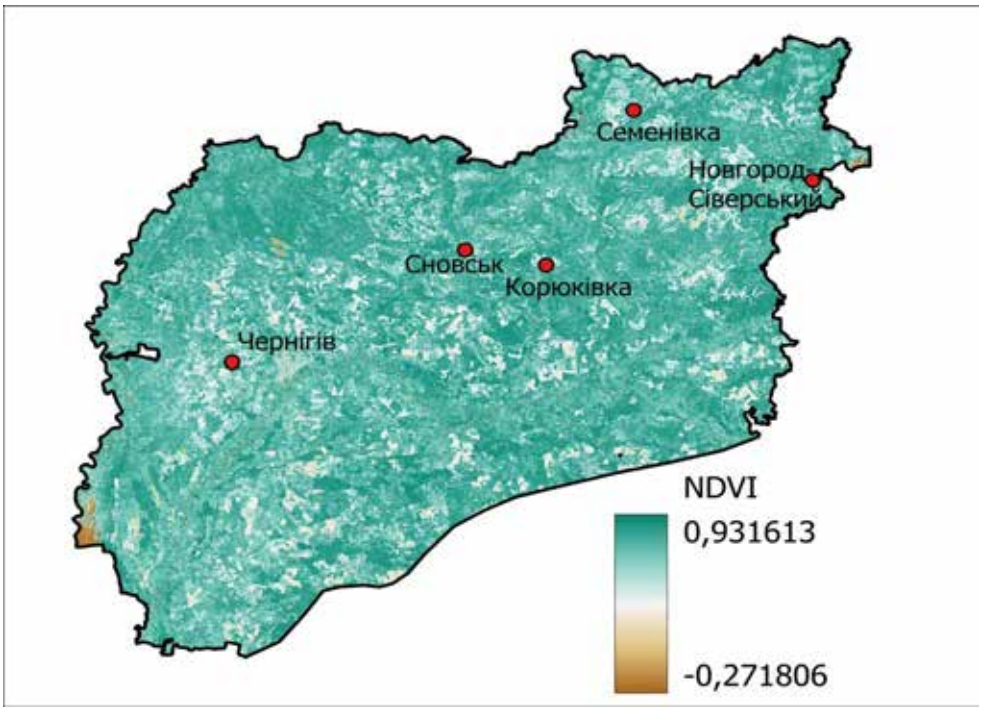


Рис. 1. Просторовий розподіл значень індексу NDVI у поліській частині Чернігівської області (за даними Sentinel-2, обробленими в QGIS) [1; 28]

а 24 – 2024 р.), що дало змогу аналізувати стан кожної ділянки відносно року виникнення змін.

Зональна статистика NDVI (Mean, Median, Stdev, Min, Max) розраховувалася для кожного полігону за кожен рік спостережень у середовищі QGIS. Подальший статистичний аналіз виконувався мовою Python 3 з використанням бібліотеки Pandas: полігони групувалися за роком змін, для кожної групи розраховувалися середнє арифметичне та стандартне відхилення значень NDVI за кожен рік спостережень. Додатково проведено порівняльний аналіз між типами втрат (пожежі, рубки) та між часовими групами (2001–2010, 2011–2015, 2016–2021, 2022–2024 рр.).

Виклад основного матеріалу. Досліджувана територія згідно фізико-географічного районування відноситься до фізико-географічної областей – Чернігівського та Новгород-Сіверського Полісся [31].

Згідно геоботанічного районування, регіон знаходиться в Європейській широколистянолісовій області Східноєвропейської провінції хвойно-широколистяних та широколистяних лісів Лівобережнополіського округу дубово-соснових, дубових, соснових лісів, заплавних луків і евтрофних боліт [32].

Таке фізико-географічне положення визначає специфіку формування лісового покриву регіону, структура якого зумовлена насамперед едафічними, гідрологічними та кліматичними умовами. На досліджуваній території переважають хвойні та мішані ліси з домінуванням соснових насаджень, значну частку займають дубові, березові та вільхові ліси.

Для оцінювання особливостей відновлення лісового покриву в межах досліджуваної території проведено аналіз часових рядів NDVI для ділянок, що зазнали змін у 2001–2024 роках. Отримані результати дозволили встановити просторово-часові закономірності відновлення лісової рослинності після рубок і пожеж.

За результатами проведеного аналізу у період 2001-2024 років зафіксовано значну просторову та часову нерівномірність втрат лісового покриву регіону. За даними аналізу, найбільший обсяг визначених ділянок припадає на 2016 рік, які сформовані після рубок різного типу – 10304 одиниць, за 2010-2011 роки – 8 673 та 9546 одиниць відповідно та у 2006 році – 8433 одиниці. Ділянки, які сформовані внаслідок пожеж різного генезу складають у 2012 році – 1 599 одиниць та у 2009 році – 414 одиниці відповідно. Загальна кількість проаналізованих ділянок спричинених рубками різного типу – понад 148000 одиниць, внаслідок пожеж – 8068 одиниці.

За час повномасштабної військової агресії, зокрема за період 2022-2024 років, програмно встановлено 125 вигорілих ділянок за 2022 рік, 385 – у 2023 році, 380 – у 2024 році, після рубок відмічено 5450, 5275 та 4857 ділянок за 2022, 2023 та 2024 рік відповідно. Збільшення кількості втрат лісового покриву внаслідок пожеж у 2023–2024 роках у порівнянні з 2022 роком свідчить про підвищення інтенсивності бойових дій, які є першопричиною формування лісових пожеж в регіоні внаслідок обстрілів, детонації нерозірваних боєприпасів, вибухонебезпечних предметів, тощо.

Динаміка показника NDVI після пожеж

Вигорілі ділянки у 2001–2010 роках, характеризуються найбільш стабільними та найвищими значеннями показника NDVI впродовж усього аналізу за період 2016–2025 років. Середній показник NDVI для цієї групи у 2016 році становив 0,738–0,812 одиниць, у 2025 році – 0,723–0,807 одиниці. Відносна стабільність або незначні коливання показника свідчать про досягнення піку відновлення лісового покриву та формування молодого зімкнутого деревостану (Рис 2.).

Виняток становлять ділянки, які вигоріли у 2009 році, показник NDVI яких за 2016 та 2025 роки становив 0,625 та 0,705 одиниці відповідно. Порівняно нижчі значення можуть пояснюватися більшою інтенсивністю та площею пожеж за попередній період, а також специфікою лісорослинних умов.

Загалом для ділянок 2001–2010 років спостерігається позитивна динаміка показника NDVI у 2022–2025 роках порівняно з 2016–2019 роками, що вказує на подальше природнє поновлення лісового покриву. Середній приріст показника NDVI для цієї групи за 2016–2025 роки становить від 0,002 до 0,025 одиниць (Табл. 1).

Ділянки, які вигоріли у 2011–2015 роках, у 2016 році (через 1-5 років після пожеж) мали суттєво нижчі значення NDVI на рівні 0,634–0,769 одиниць у порівнянні з початковим етапом. Протягом 2016–2025 років для них зафіксовано чітку висхідну тенденцію, коли значення NDVI у середньому зростало на 0,010–0,025 одиниць на рік. До 2025 року показник для цієї групи ділянок досяг значень на рівні 0,700–0,726 одиниць, що свідчить про активне природнє поновлення лісового покриву з формуванням молодого деревостану.

Особливу увагу привертають вигорілі ділянки у 2012 році, на яких відведено найбільшу кількість полігонів – 1 599. У 2016 році їх показник NDVI становив 0,724 одиниць, однак у 2022 році спостерігалося незначне зниження до 0,663 одиниці, що ймовірно, пов'язано з початком бойових дій та їх безпосередніми наслідками у перші місяці повномасштабного вторгнення.

Група вигорілих ділянок, які зазнали змін у 2016–2021 роках, демонструють найбільше зростання показника NDVI. Це пояснюється тим, що у 2016–2017 роках за допомогою супутникових знімків їх безпосередній стан зафіксовано одразу після змін, тоді як космознімки до 2025 року відображають період активного відновлення даних територій. Таким чином, можна констатувати, що у рік змін

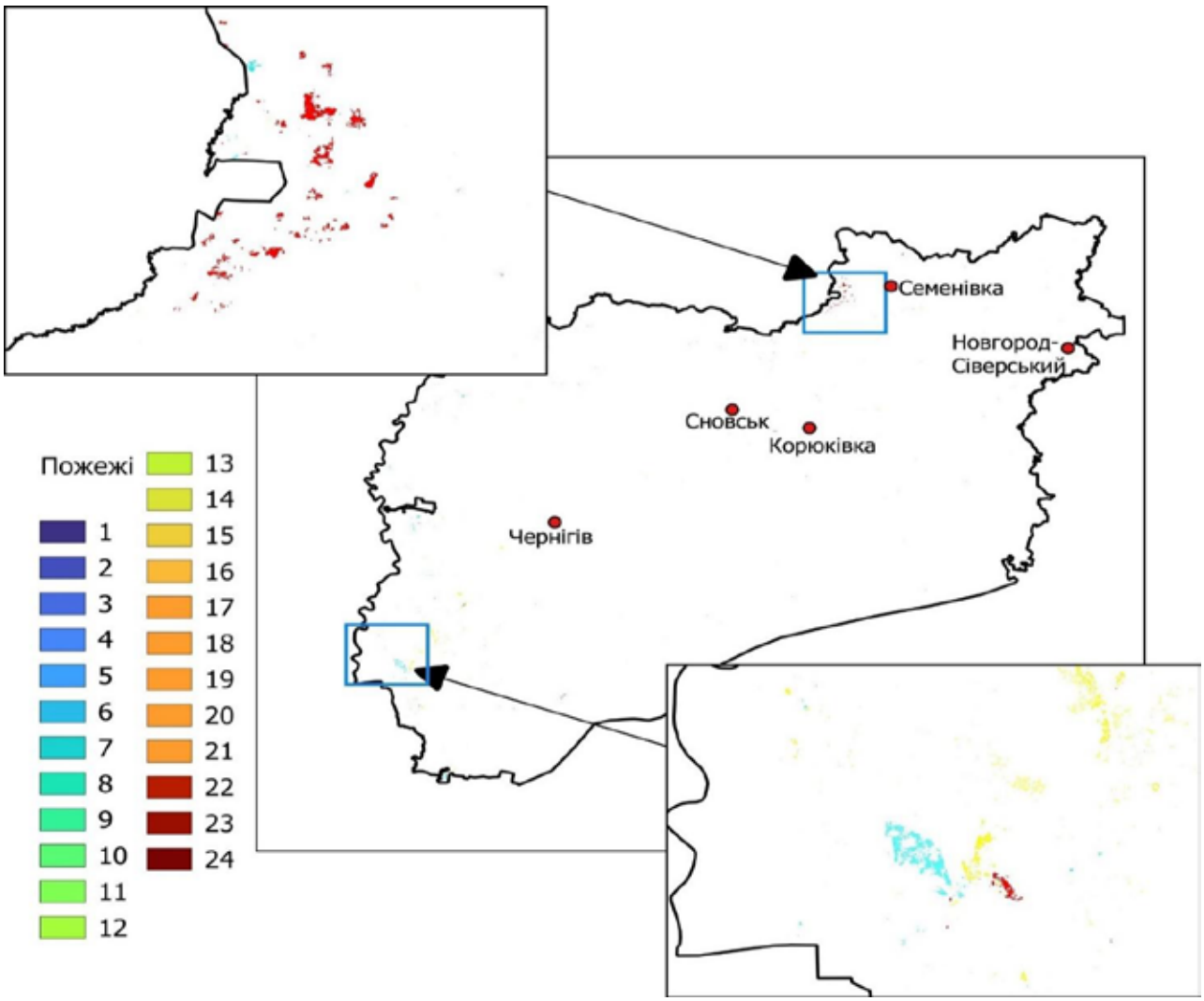


Рис. 2. Просторово-часовий розподіл досліджуваних ділянок після пожеж у поліській частині Чернігівської області (за даними Global Forest Watch, обробленими в QGIS) [2; 28]

Таблиця 1

Динаміка показника NDVI після пожеж і рубок за даними 2016, 2022 та 2025 років

Період	Пожежі (2016 р.)	Пожежі (2022 р.)	Пожежі (2025 р.)	Рубки (2016 р.)	Рубки (2022 р.)	Рубки (2025 р.)
2001–2005 рр.	0,752	0,742	0,738	0,786	0,770	0,768
2006–2010 рр.	0,736	0,751	0,761	0,779	0,768	0,767
2011–2015 рр.	0,698	0,698	0,717	0,733	0,741	0,757
2016–2021 рр.	0,748	0,631	0,659	0,785	0,695	0,726
2022 р.	0,788	0,525	0,592	0,820	0,656	0,727
2023 р.	0,768	0,651	0,586	0,808	0,753	0,697
2024 р.	0,775	0,746	0,590	0,808	0,773	0,667

лісового покриву показник NDVI різко падає (для пожеж часто нижче 0,60 одиниць), після чого поступово зростає в наступні роки.

Показник NDVI для ділянок після пожеж у 2019 році становив 0,570 одиниці, які до 2025 року відновились до 0,649 одиниці, а ділянки 2020 року, показник NDVI яких становив 0,517, відновилися до 0,587 одиниць у 2025 році, що свідчить про ще незавершений процес відновлення у період 5-6 років після вигоряння.

Для вигорілих ділянок 2017–2018 року характерне помітне зростання показника NDVI, особливо в період 2021–2025 років, що є співставним з періодом 4–8 року сукцесії, що за проведеним аналізом

космознімків підтверджуються активним зімкненням трав'яно-чагарникового ярусу та формуванням молодого деревостану.

Рослинний покрив на вигорілих ділянках за період повномасштабного вторгнення за даними аналізу знаходиться у найбільш критичному стані. Середнє значення NDVI у 2022 році, на який припало вигоряння становить 0,525, з урахуванням того, що до 2022 року ці ділянки мали NDVI на рівні 0,788, можна констатувати, що показник знизився на 0,263 одиниці або ж приблизно на 33%. У 2023 р. показник NDVI становить 0,542, у порівнянні з попереднім показником у 2022 р на рівні 0,651 – значення знизилося на 0,109 одиниці. У 2024 р. показник NDVI становив 0,604, у порівнянні з показником 2023 р. – 0,665, зниження відбулося на 0,061 одиниці.

Динаміку відновлення після пожеж до 2025 року можна охарактеризувати відносно повільною. Ділянки після пожеж у 2022 році досягли показника NDVI лише на рівні 0,592, ділянки 2023 р. – 0,586, а ділянки 2024 р. – 0,590, що в останньому випадку відображає майже нульовий приріст за один рік після вигоряння. Прогнозуючи, можна констатувати, що при відсутності повторних деградаційних змін, відносно повне відновлення цих ділянок може тривати 15–25 років.

Слід зазначити, що відносно невисоке значення показника NDVI на рівні 0,525 в рік у період вигоряння в 2022 році частково пояснюється тим, що аналіз за 2022 рік формувався за знімками, отриманими до, під час і після пожежі, що дещо занижує реальну оцінку падіння показника у безпосередньому стані даних територій після вигорання.

Динаміка показника NDVI після рубок

Проведений аналіз виявив суттєву відмінність рубок різного типу над пожежами за показником NDVI у всіх досліджуваних часових рядах. Для ділянок 2001–2010 років у 2025 р. середній показник NDVI після рубок становить на рівні 0,769–0,786, тоді як для пожеж – 0,723–0,807. Однак ключовою відмінністю є стабільність рівномірного та прогнозованого відновлення без різких відхилень лісових територій, про що свідчать показники NDVI (Рис. 3.).

Найбільш виразна відмінність спостерігається за період повномасштабних бойових дій. Ділянки рубок у 2022 році мали показник NDVI на рівні 0,656 одиниць, що на 0,131 вище, ніж при пожежах різного генезу – 0,525 одиниць, а у 2025 році – 0,727 одиниці проти 0,592. Таку різницю можна пояснити принципово різним характером впливу на досліджувані території. Після рубок, попри видалення деревостану, зберігається моховий ярус, підлісок та кореневі системи дерев, що в свою чергу забезпечує активне відновлення трав'яно-чагарникового ярусу та швидке поновлення піонерних видів деревних рослин. Пожежі, в тому числі верхові, знищують увесь рослинний покрив, завдають пошкодження гумусовому шару ґрунту, що суттєво сповільнює процеси первинної сукцесії.

Території після рубок у період повномасштабного вторгнення характеризуються більш задовільним станом у порівнянні з територіями після пожеж, проте за показниками також відстають від норми відновлення. Характерно, що території після рубок за 2022 рік у 2025 році відновились до 0,727 одиниць NDVI, що є прийнятним рівнем для трирічного відновлення після рубок. Ділянки після рубок у 2024 році, станом на 2025 рік мають показник NDVI на рівні 0,667 одиниць, що є дещо нижчим, ніж аналогічний показник за 2016, коли показник NDVI становив приблизно 0,68–0,72 одиниць. Це може свідчити про недотримання норм лісовідновлювальних заходів в умовах дії воєнного стану та обмежених можливостей для доступу до пошкоджених територій задля їх відновлення.

Прогноз відновлення лісового покриву

Таким чином, до 2035 року більшість ділянок, які зазнали змін у 2016–2021 роках досягнуть значень показника NDVI на рівні або більше 0,70–0,75 одиниць, що буде свідчити про формування зімкнутого молодого деревостану. Ділянки 2001–2010 років ймовірно сформують стиглі ліси з показником NDVI більше 0,78–0,82 одиниць. Деградовані ділянки 2022–2024 років залишатимуться в стані активного відновлення до 2035–2040 років навіть за оптимістичного сценарію завершення бойових дій.

Для вигорілих та деградованих ділянок внаслідок військових дій за період 2022–2024 років можна сформувати три варіанти прогнозованої динаміки відновлення:

1. Відсутність повторних змін, активне лісовідновлення. За умови відсутності повторних пожеж та деградаційних змін внаслідок обстрілів, очищення та розмінування даних територій, проведення санітарних рубок, лісокультурних заходів та за рахунок природнього поновлення можна очікувати у найближчі 5 років (2027–2030 роки), що показник NDVI для ділянок 2022 року досягне значення в 0,65–0,70 одиниць, через 10 років (2032–2035 роки) – 0,72–0,77 одиниць, через 15–20 років – 0,75–0,82 одиниць, тобто рівня, який характерний для ділянками 2001–2010 років станом на 2025 рік. Проте, даний сценарій є малоймовірним через продовження бойових дій.

2. Природне відновлення без активного залучення антропогенного чинника. При природній сукцесії без цілеспрямованих лісовідновлювальних заходів відновлення сповільнюється приблизно в 1.3–1.8 рази. Досягнення показника NDVI більше 0,75 одиниць очікується через 20–30 років для вигорілих ділянок та через 15–20 років – для рубок.

3. Повторні деградаційні зміни, продовження бойових дій. При повторних пожежах або постійному антропогенному навантаженні частина ділянок може перейти у стадію деградованих земель з пере-

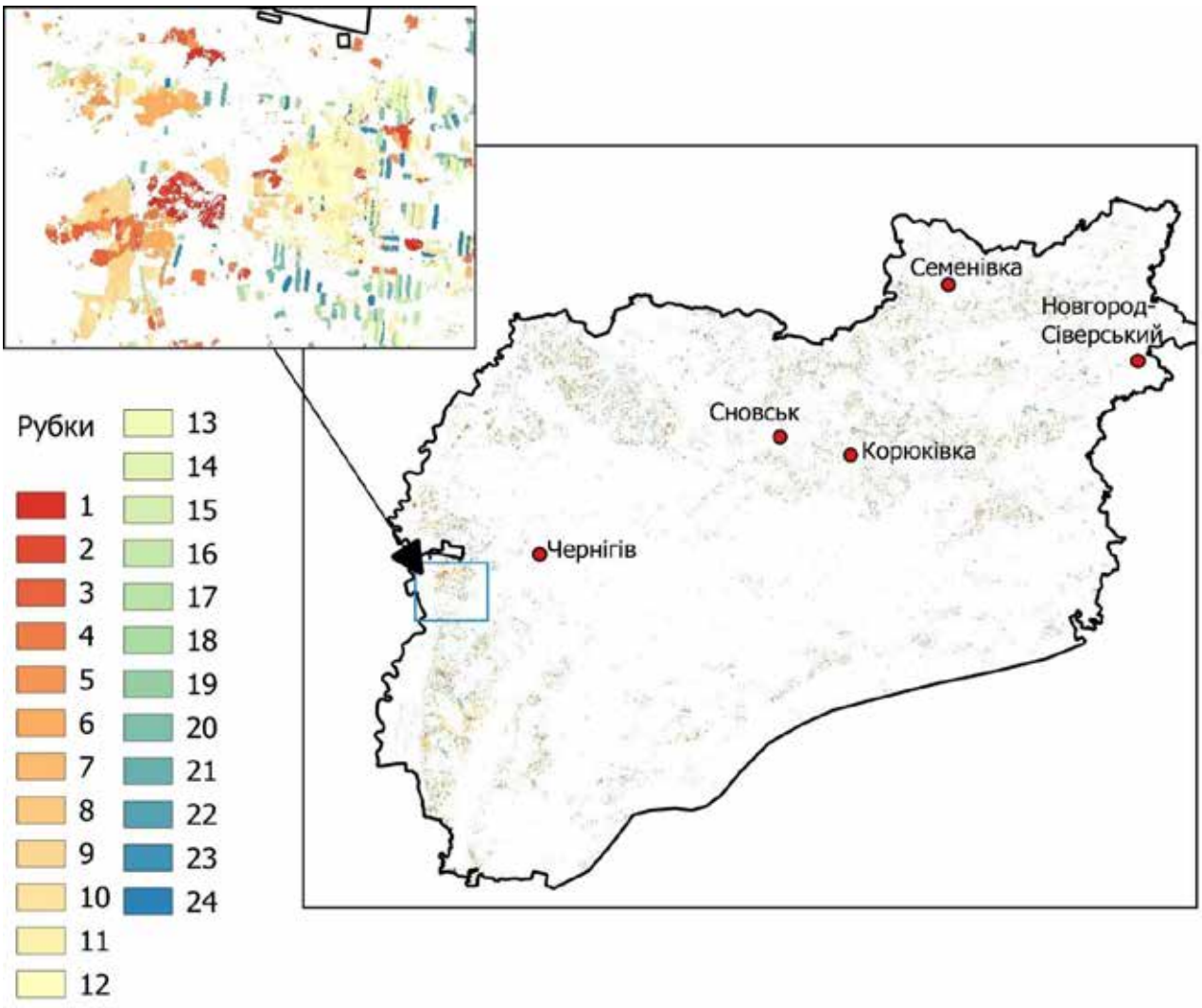


Рис. 3. Просторово-часовий розподіл досліджуваних ділянок після рубок у поліській частині Чернігівської області (за даними Global Forest Watch, обробленими в QGIS) [2; 28]

важанням участі швидкорослих піонерних видів рослин у трав'яному та чагарниковому ярусі замість деревостану. Деякі ділянки 2022–2024 років з дуже низьким показником NDVI, подекуди нижче 0,50 одиниць та за рахунок постійних обстрілів, можуть не досягти попереднього стану без проведення спеціальних лісовідновлювальних заходів (Табл. 2.).

Критичним фактором при прогнозуванні є невизначений масштаб деградації лісових територій внаслідок військових дій. Попередньо, до 20-30 % лісових територій можуть бути виключені з лісогосподарського обігу на 10-30 років на період робіт з розмінування та проведення лісовідновлювальних і господарських заходів.

Незважаючи на отримані результати, представлений аналіз має ряд методологічних обмежень, які необхідно враховувати при інтерпретації результатів:

1. Відсутність вихідного значення показника NDVI для кожного окремого полігону, що в свою чергу не дає змоги точно розрахувати індивідуальний відсоток відновлення для окремо взятої ділянки, замість цього використовуються групові середні показники за рахунок чого знижується точність аналізу.

2. Відсутність точного зафіксованого моменту змін досліджуваних лісових територій у часових рядах, особливо для ділянок 2022–2024 років з тривалими або повторюваними пожежами.

3. Відсутність знімків за 2018 рік у представленому аналізі є некритичною, проте помітною прогалиною у часовому ряді.

4. Векторні шари змін лісового покриву не розрізняють ступінь інтенсивності та типи пожеж і рубок, що є важливим фактором для прогнозування відновлення досліджуваних територій.

Головні висновки. На основі аналізу часових рядів NDVI, сформованих за супутниковими даними Sentinel-2 за 2016–2025 роки, для ділянок із відомим роком втрати лісового покриву (2001–2024 рр.),

Таблиця 2

Стадії відновлення лісового покриву залежно від типу та давності змін за значеннями NDVI (станом на 2025 р.)

Роки змін лісового покриву	Вік станом на 2025 р.	Показник NDVI пожеж (2025 р.)	Показник NDVI рубок (2025 р.)	Стан вигорілих ділянок	Стан ділянок після рубок
2001–2010 рр.	15-24 років	> 0,74	> 0,76	Високий рівень відновлення	Високий рівень відновлення
2011–2015 рр.	10-14 років	0,63–0,70	0,68–0,73	Активне відновлення	Швидке відновлення
2016–2021 рр.	4-9 років	0,60–0,81	0,65–0,82	Часткове відновлення	Помірне відновлення
2022–2024 рр.	1-3 роки	0,53–0,66	0,59–0,73	Початкова стадія	Початкова стадія

встановлено чіткий зв'язок між типом, давністю та інтенсивністю змін лісового покриву і його сучасним станом. Ділянки, що зазнали змін у 2001–2010 роках, досягли високого рівня відновлення, а значення NDVI у 2025 році становили 0,74–0,81. Натомість території, які зазнали змін у 2022–2024 роках, перебувають на початковій стадії відновлення, для яких значення NDVI у 2025 році становили 0,59–0,73.

Встановлено, що відновлення лісового покриву після рубок відбувається швидше, ніж після пожеж. Значення NDVI на ділянках після рубок були у 1,2–1,6 рази вищими порівняно з територіями, пошкодженими пожежами, що, ймовірно, пов'язано зі збереженням ґрунтового покриву, мохового ярусу, підліску та чагарникової рослинності. Найбільші відмінності простежуються протягом 3–7 років після виникнення змін.

Отримані результати свідчать, що втрати лісового покриву, спричинені бойовими діями у 2022–2024 роках, зумовили найбільш суттєве зниження значень NDVI за весь період досліджень. Для територій, пройдених пожежами у 2022 році, середнє зниження NDVI становило 0,263 одиниці, тоді як за три роки (до 2025 року) показник збільшився лише на 0,067 одиниці, що відповідає менш ніж 26 % від початкових втрат.

Орієнтовний час відновлення лісового покриву на територіях, що зазнали впливу бойових дій, становить 15–25 років для ділянок, пошкоджених пожежами, та 12–20 років для територій після рубок за умови відсутності повторних деградаційних змін і додаткового негативного впливу, пов'язаного із забрудненням територій внаслідок бойових дій.

Дослідження підтвердило ефективність використання багаторічних часових рядів NDVI, сформованих на основі супутникових даних Sentinel-2, у поєднанні із зональною статистикою векторних шарів для регіонального моніторингу стану лісових екосистем. Перспективними напрямами подальших досліджень є використання безперервних часових рядів Landsat + Sentinel-2, розрахунок індивідуального базового рівня (Baseline NDVI) для окремих ділянок та інтеграція оптичних супутникових даних із даними SAR і LiDAR.

Перспективи використання результатів. Отримані результати дослідження є науковою основою для обґрунтування лісовідновлювальних заходів у найбільш пошкоджених лісових масивах у повоєнний період, особливо на територіях, розташованих у 20-кілометровій прифронтовій зоні, де лісові екосистеми зазнали найбільших змін унаслідок бойових дій.

Важливим напрямом застосування отриманих результатів є створення та впровадження системи дистанційного моніторингу. Така система може охоплювати як окремі лісові ділянки, так і лісовий покрив регіону в цілому, що забезпечить оперативне отримання даних в умовах повномасштабних бойових дій, а також супутніх ризиків і обмежень доступу до визначених територій.

Результати дослідження м*ожуть бути використані для оцінювання та підвищення ефективності лісогосподарських заходів, що здійснюються філіями ДП «Ліси України». Це дасть змогу вдосконалити планування господарської діяльності та забезпечити більш раціональне використання лісових ресурсів.

Окремим напрямом є оптимізація меж і режимів охорони лісових об'єктів природно-заповідного фонду. Дистанційний моніторинг у поєднанні з класичними дослідженнями забезпечать підвищення ефективності щодо заходів збереження біорізноманіття та підвищення стійкості природних комплексів.

Крім того, результати дослідження можуть бути використані для розроблення регіональних нормативів лісовідновлення з урахуванням природно-кліматичних особливостей регіону та антропогенного впливу на лісові екосистеми Лівобережного Полісся. Це створить підґрунтя для впровадження адаптивних підходів до відновлення лісів у сучасних умовах лісокористування.

Література

1. Sentinel-2. Copernicus Sentinel Missions. URL: https://dataspace.copernicus.eu/data-collections/copernicus-sentinel-missions/sentinel-2 (дата звернення: 19.05.2026).
2. Global Forest Watch 2026. URL: https://www.globalforestwatch.org (дата звернення: 22.05.2026).
3. Google Earth 2026. URL: https://earth.google.com/web/ (дата звернення: 25.05.2026).
4. Forkel M., Carvalhais N., Verbesselt J., Mahecha M. D., Neigh C. S. R., Reichstein M. Trend Change Detection in NDVI Time Series: Effects of Inter-Annual Variability and Methodology. *Remote Sensing*. 2013. 5(5). P. 2113-2144. https://doi.org/10.3390/rs5052113
5. Nguyen T. H., Jones S. D., Soto-Berelov M., Haywood A., Hislop S. A spatial and temporal analysis of forest dynamics using Landsat time-series. *Remote Sensing of Environment*. 2018. 217. P. 461-475. https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.028
6. Kennedy R. E., Yang Z., Cohen, W. B. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr – Temporal segmentation algorithms. *Remote Sensing of Environment*. 2010. 114(12). P. 2897-2910. https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.07.008
7. Kurnaz B., Bayik C., Abdikan S. Forest Fire Area Detection by Using Landsat-8 and Sentinel-2 Satellite Images: A Case Study in Mugla, Turkey. *Research Square*. 2020. P. 1-16. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-26787/v1
8. Pelc-Mieczkowska R. The Application of Sentinel-2 Data for Automatic Forest Cover Changes Assessment – Białowieża Primeval Forest Case Study. *Civil and Environmental Engineering Reports*. 2021. 31(4). P. 148-166. https://doi.org/10.2478/ceer-2021-0054
9. Ács N., Heil B., Szász B., Folcz Á., Preisinger M., Sándor G., Czimber K. Two-Phase Forest Damage Assessment with Sentinel-2 NDVI Double Differencing and UAV-Based Segmentation in the Sopron Mountains. *Remote Sensing*. 2026. 18(5). 803. https://doi.org/10.3390/rs18050803
10. Shimizu K., Ota T., Mizoue N. Accuracy Assessments of Local and Global Forest Change Data to Estimate Annual Disturbances in Temperate Forests. *Remote Sensing*. 2020. 12(15). 2438. https://doi.org/10.3390/rs12152438
11. Wang L., Liu S., Song W., Ding S., Zhang J. Global high-resolution forest disturbance type dataset. *Earth Syst. Sci. Data*. 2026. 18. P. 1601-1617, https://doi.org/10.5194/essd-18-1601-2026
12. Pflugmacher D., Cohen W. B., Kennedy R. E., Yang Z. Using Landsat-derived disturbance and recovery history and lidar to map forest biomass dynamics. *Remote Sensing of Environment*. 2014. 151. P. 124-137. https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.05.033
13. Smith-Tripp S., Coops N., Mulverhill C., White J., Gergel S. Post-fire structural forest recovery associated with climate extremes in dry sub-boreal forests. *Landsc Ecol*. 2026. 41. 14. https://doi.org/10.1007/s10980-025-02266-y
14. Бідолах Д.І. Геоінформаційний моніторинг стану зелених насаджень із використанням методів дистанційного зондування. *Український журнал лісівництва та деревинознавства*. 2020. 11(2). С. 4-14. https://doi.org/10.31548/forest2020.02.004
15. Бурштинська Х.В., Поліщук Б.В., Ковальчук О.Ю. Дослідження методів класифікації лісів з використанням космічних знімків високого розрізнення. *Геодезія, картографія і аерофотознімки*. 2013.78. С. 101-110.
16. Глух О.С., Симканич О.І., Качаєв В.М., Глюдзик Е.І. Зміна NDVI-індексу Карпатського регіону України протягом 2000-2022 років. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія: Хімія*. 2023. 1(49). С. 62-67. https://doi.org/10.24144/2414-0260.2023.1.62-67
17. Жуков О.В., Гофман О.П. Аналіз часових рядів показника NDVI рослинності Великого Чапельського поду за 2010–2015 рр. *Наукові записки НаУКМА. Біологія та екологія*. 2016. 184. С. 40-46.
18. Ліщенко Л.П. Супутниковий моніторинг стану геосистеми локального рівня на прикладі Матвіївського лісу поблизу м. Миколаєва (Україна). *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2023. 10(2). С. 27–34. https://doi.org/10.36023/ujrs.2023.10.2.228
19. Лутців Н.Г., Чухна П.В. Використання геоінформаційних систем як інноваційних інструментів стратегії розвитку та підвищення ефективності діяльності суб'єктів лісового господарства. *Наукові праці Лісівничої академії наук України*. 2024. 27. С. 150-157. https://doi.org/10.15421/412422
20. Мельник А.А., Ячнюк М.О. Застосування геоінформаційних технологій для спостереження за лісовим покривом. *Науковий вісник ХДУ. Серія Географічні науки.* 2022. № 16. С. 32-39. https://doi.org/10.32999/ksu2413-7391/2022-16-3
21. Слободяник М.П. Використання методів ДЗЗ та ГІС-технологій для моніторингу лісових ресурсів. *Вісник геодезії та картографії*. 2014. 1(88). С. 27- 31.
22. Тищенко О.Г., Півовар П.В., Цидик Н.М. Оцінка впливу наслідків природних пожеж на лісові екосистеми за даними космічного знімання і таксаційного обстеження лісових насаджень. *Ядерна енергетика та довкілля*. 2024. Вип. 2(30). С. 72-83. https://doi.org/10.31717/2311-8253.24.2.8
23. Цуняк А.М., Часковський О.Г., Король М.М. Розподіл наземного вкриття Стрийсько-Сянської Верховини на основі супутникових знімків LANDSAT. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2013. 23(14). С. 27-32
24. Шпурик В.В., Бандурка О.І. Інформаційна система аналізу антропогенного впливу на стан лісових насаджень. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2021. 3(72). С. 25-36. https://doi.org/10.31673/2412-4338.2021.032536
25. Яковенко О.І. Геоінформаційний аналіз змін лісової рослинності лесових «островів» Чернігівського Полісся. *Biota. Human. Technology*. 2023. 2. С. 31-40. https://doi.org/10.58407/bht.2.23.3
26. Крайнюк О., Буц Ю., Барбашин В., Нікітченко О., Сухов В. Деградація екосистем у Харківській області під час війни: супутниковий аналіз. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*. 2024. (61). С. 329-343. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-26
27. Асмаковський Є. В. Аналіз масштабу лісових пожеж за квітень-травень 2026 року у 20-ти кілометровій прифронтовій зоні Чернігівської області та їх прогнозований вплив на природно-заповідні території регіону. *One World – One Health*. Third International Scientific and Practical Conference (June 10–11, 2026, Chernihiv, Ukraine.). Чернігів: Видавництво «Десна Поліграф». 2026. С. 39-43.

28. QGIS. Spatial without Compromise. QGIS Version 3.44. URL: https://qgis.org/uk/site/ (дата звернення: 28.05.2026).
29. Hansen M.C, Potapov P.V, Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S.V., Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*. 2013. 342(6160). P. 850-853. https://doi.org/10.1126/science.1244693
30. Tyukavina A., Potapov P., Hansen M.C., Pickens A., Stehman S., Turubanova S., Parker D., Zalles V., Lima A., Kommareddy I., Song X-P, Wang L., Harris N. Global trends of forest loss due to fire, 2001-2019. *Frontiers in Remote Sensing*. 2022. 3:825190. https://doi.org/10.3389/frsen.2022.825190
31. Маринич О.М., Пархоменко Г.О., Петренко О.М., Шищенко П.Г. Удосконалена схема фізико-географічного районування України. *Український географічний журнал*. 2003. № 1. С. 16-20.
32. Дідух Я.П., Шеляг-Сосонко Ю.Р. Геоботанічне районування України та суміжних територій. *Український ботанічний журнал*. 2003. Т. 60, № 1. С. 6-17.

Дата першого надходження статті до видання: 17.07.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

ЕКОЛОГІЯ СТІЧНИХ ВОД

УДК 504:628.4:621.311
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.36

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ЧАСТОТНОЇ СТАБІЛІЗАЦІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ СТІЧНИХ ВОД ОВОЧЕВОЇ КОНСЕРВАЦІЇ

Себко В.В.[1] (orcid.org/0000-0002-3561-6281)
Босюк А.С.[1] (orcid.org/0000-0001-5254-2272)
Махоніна О.С.[1] (orcid.org/0000-0002-1762-6953)
Нус І.Б.[2] (orcid.org/0009-0002-0166-5648)
[1]Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, 61002, м. Харків
[2]Компанія «Ohmium PEM electrolyzers»
Erika-Mann-Strasse 63, 80636, Muenchen
Vadym.Sebko@khpi.edu.ua, Alona.Bosiuk@mit.khpi.edu.ua,
Oksana.Makhonina@khpi.edu.ua, igor.nus@ohmium.com

У роботі досліджено безконтактний багатопараметровий електромагнітний метод контролю електрофізичних параметрів стічних вод підприємств з виробництва консервованих огірків та овочевих маринадів. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю оперативного екологічного моніторингу водних середовищ зі складним іонним складом та змінними фізико-хімічними характеристиками. Запропонований метод базується на частотній стабілізації електромагнітної взаємодії між змінним магнітним полем та вихровими струмами, індукованими у контрольованому рідкому середовищі. Для реалізації методу використано трансформаторний електромагнітний перетворювач, який забезпечує формування первинного магнітного поля та реєстрацію вторинного електромагнітного сигналу. Теоретично обгрунтовано взаємозв'язок між частотою електромагнітного поля, питомою електропровідністю, температурою та параметрами електромагнітної взаємодії. Показано, що автоматична зміна робочої частоти відповідно до зміни електропровідності дозволяє підтримувати стабільний режим електромагнітної взаємодії та зменшувати вплив температурного фактора на результати контролю. Експериментальні дослідження проведено для стічних вод овочевої консервації в діапазоні температур від 12 до 30 ºС із використанням електромагнітного перетворювача радіусом $62 \cdot 10^{-3}$м та початковою частотою f_0 = 20 МГц. В процесі досліджень визначали питому електропровідність, фазовий зсув, температуру, pH та узагальнені параметри електромагнітної взаємодії. Встановлено, що зі зростанням температури питома електропровідність стічних вод збільшується від $8{,}29 \cdot 10^{-1}$ до $11{,}12 \cdot 10^{-1}$ См/м, а фазовий зсув зростає від 6,53 до 8,46º. Одночасно спостерігається поступове зменшення значень pH від 6,90 до 6,52, що характеризує зміну електрохімічного стану контрольованого середовища. Отримані результати підтверджують чутливість інформативних параметрів електромагнітного сигналу до зміни електрофізичних характеристик стічних вод. Запропонований метод забезпечує можливість безконтактного визначення параметрів рідкого середовища без використання електродів, що зменшує вплив поляризаційних та корозійних процесів на результати вимірювань. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості застосування методу частотної стабілізації електромагнітної взаємодії для створення автоматизованих систем екологічного моніторингу стічних вод підприємств харчової промисловості. Запропонований підхід може бути використаний для оперативного контролю зміни електрофізичних параметрів водного середовища та оцінювання його стану в умовах виробничого моніторингу. *Ключові слова:* стічні води, овочева консервація, електромагнітний метод, частотна стабілізація, електропровідність, фазовий зсув, екологічний моніторинг, безконтактний контроль.

Application of the frequency stabilisation method of electromagnetic interaction for environmental monitoring of wastewater from vegetable canning. Sebko V., Bosiuk A., Makhonina O., Nus I.

The paper investigates a non-contact multiparametric electromagnetic method for monitoring the electrophysical parameters of wastewater generated by an enterprise producing canned cucumbers and vegetable marinades. The relevance of the study is determined by the need for rapid environmental monitoring of aqueous media characterized by a complex ionic composition and variable physicochemical properties. The proposed method is based on frequency stabilization of the electromagnetic interaction between an alternating magnetic field and eddy currents induced in the controlled liquid medium. A transformer-type electromagnetic transducer is employed to generate the primary magnetic field and record the secondary electromagnetic signal. The relationship between the electromagnetic field frequency, electrical conductivity, temperature, and electromagnetic interaction parameters is theoretically substantiated. It is demonstrated that automatic adjustment of the operating frequency in response to changes in electrical conductivity makes it possible to maintain a stable electromagnetic interaction regime and reduce the influence of temperature on monitoring results.

© Себко В.В., Босюк А.С., Махоніна О.С., Нус І.Б., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Experimental studies were conducted on wastewater from vegetable canning production over a temperature range of 12–30 ºC using an electromagnetic transducer with a working radius of $62 \cdot 10^{-3}$ m and an initial frequency of f_0 = 20 MHz. Electrical conductivity, phase shift, temperature, pH, and generalized electromagnetic interaction parameters were determined during the experiments. It was established that, with increasing temperature, the electrical conductivity of the wastewater increased from $8.29 \cdot 10^{-1}$ to $11.12 \cdot 10^{-1}$ S/m, while the phase shift increased from 6.53 to 8.46º. At the same time, a gradual decrease in pH from 6.90 to 6.52 was observed, indicating changes in the electrochemical state of the controlled medium. The obtained results confirm the sensitivity of the informative parameters of the electromagnetic signal to changes in the electrophysical characteristics of wastewater. The proposed method enables non-contact determination of liquid-medium parameters without the use of electrodes, thereby reducing the influence of polarization and corrosion processes on measurement results. The practical significance of the obtained results lies in the potential application of the frequency stabilization method for electromagnetic interaction in the development of automated environmental monitoring systems for wastewater from food-processing enterprises. The proposed approach can be used for operational monitoring of changes in the electrophysical parameters of aqueous media and assessment of their condition under industrial monitoring conditions. *Key words:* wastewater, vegetable canning, electromagnetic method, frequency stabilization, electrical conductivity, phase shift, environmental monitoring, non-contact monitoring.

Постановка проблеми. Стічні води підприємств овочевої консервації, зокрема підприємств з виробництва консервованих огірків та овочевих маринадів, характеризуються значним вмістом органічних домішок, солей, залишків овочевої сировини та технологічних реагентів. Зміна технологічних режимів виробництва, складу сировини та кількості використаних технологічних реагентів зумовлює відповідну варіацію електропровідності, фазових характеристик електромагнітного сигналу та інших параметрів взаємодії контрольованого середовища з електромагнітним полем. Традиційні контактні методи вимірювання мають ряд недоліків, пов'язаних із поляризацією електродів, корозією чутливих елементів та нестабільністю вимірювань у забруднених середовищах. У зв'язку з цим перспективним напрямом є використання безконтактних електромагнітних методів контролю. Це створює передумови для використання електромагнітних характеристик як інформативних ознак під час оперативного оцінювання стану стічних вод. Під час взаємодії змінного магнітного поля з електропровідним рідким середовищем у ньому індукуються вихрові струми. Їх інтенсивність і просторовий розподіл залежать насамперед від питомої електропровідності середовища та частоти збуджувального поля. Зі зміною електропровідності змінюється характер електромагнітного навантаження перетворювача, що проявляється у зміні амплітуди та фазового співвідношення первинного і вторинного сигналів. Таким чином, параметри вторинного електромагнітного сигналу можуть використовуватися для непрямого визначення характеристик контрольованого рідкого середовища.

Важливим фактором, який необхідно враховувати під час електромагнітного контролю стічних вод, є температура. Підвищення температури призводить до зміни рухливості іонів та, відповідно, питомої електропровідності розчину. Якщо робоча частота вимірювальної системи залишається незмінною, температурні зміни можуть спричиняти додаткову варіацію параметрів електромагнітного сигналу та погіршувати достовірність контролю. Тому, для забезпечення стабільності вимірювального режиму доцільним є автоматичне коригування частоти збуджувального сигналу відповідно до зміни електропровідності контрольованого середовища. Застосування принципу частотної стабілізації дозволяє підтримувати близький до сталого режим електромагнітної взаємодії перетворювача зі стічними водами при зміні їх електрофізичних характеристик. У такому випадку частота електромагнітного поля розглядається не лише як параметр збудження, а і як керована інформаційна величина, пов'язана зі зміною електропровідності середовища. Це створює можливість зменшити вплив температурного фактора та підвищити стабільність визначення інших інформативних характеристик.

Додатковим джерелом інформації про стан стічних вод є фазовий зсув між первинним і вторинним електромагнітними сигналами. Його зміна пов'язана з перерозподілом активної та реактивної складових електромагнітної взаємодії та може відображати зміни електропровідності й температури контрольованого середовища. Одночасне використання електропровідності, фазового зсуву, температури, pH та узагальненого параметра електромагнітної взаємодії формує багатопараметрову інформаційну систему контролю. Особливістю безконтактного підходу є відсутність безпосереднього контакту вимірювальних елементів із досліджуваною рідиною. Це є суттєвою перевагою під час роботи зі стічними водами, оскільки зменшується вплив поляризації та корозії електродів, а також пов'язаних із ними змін контактного опору. Внаслідок цього електромагнітний метод може бути адаптований для тривалого автоматизованого контролю параметрів стічних вод у виробничих умовах.

Отже, поєднання безконтактного електромагнітного перетворення та частотної стабілізації режиму взаємодії створює теоретичну основу для оперативного багатопараметрового екологічного моніторингу стічних вод овочевої консервації. При цьому зміна частоти, електропровідності та фазових характеристик може розглядатися як взаємопов'язаний комплекс інформаційних ознак, на основі якого здійснюється оцінювання поточного стану контрольованого середовища.

Актуальність дослідження. Стічні води підприємств овочевої консервації характеризуються змінним іонним складом, наявністю органічних та мінеральних компонентів, а також значною залежністю електрофізичних характеристик від температури t. Такі особливості ускладнюють оперативний контроль стану водного середовища, оскільки зміна температури та концентрації іонів одночасно впливає на електропровідність χ, фазові характеристики та інші параметри електромагнітної взаємодії. У зв'язку з цим актуальним є створення методів контролю, здатних забезпечувати стабільні вимірювальні умови при зміні фізико-хімічного стану стічних вод. Особливого значення набуває використання безконтактних електромагнітних методів, які не потребують безпосереднього контакту чутливих елементів із досліджуваною рідиною. На відміну від контактних електродних засобів, такий підхід дозволяє зменшити вплив поляризаційних і корозійних процесів та створює передумови для тривалої роботи вимірювальних систем у складних водних середовищах. Додатковою перевагою є можливість використання одного перетворювача для отримання інформації про декілька параметрів контрольованого середовища.

Науковий інтерес становить застосування методу частотної стабілізації електромагнітної взаємодії, за якого робоча частота f змінюється відповідно до зміни питомої електропровідності χ стічних вод. Підтримання сталого узагальненого параметра електромагнітної взаємодії дає можливість компенсувати вплив зміни електрофізичного стану середовища та забезпечити більш стабільний режим вимірювань. При цьому аналіз сукупності питомої електропровідності χ, фазового зсуву φ, температури t, pH та узагальненого параметра Q_t розширює інформаційну основу оцінювання стану стічних вод.

Таким чином, актуальною науково-практичною проблемою є удосконалення безконтактного багатопараметрового контролю стічних вод підприємств овочевої консервації шляхом стабілізації електромагнітної взаємодії та адаптивного керування робочою частотою вимірювальної системи. Розв'язання цієї проблеми створює основу для підвищення інформативності та стабільності оперативного екологічного моніторингу. Застосування питомої електропровідності χ, фазового зсуву φ, температури t, pH та узагальненого параметра Q_t як взаємопов'язаних інформативних характеристик дозволяє сформувати комплексний підхід до оцінювання електрофізичного стану стічних вод. Це створює передумови для подальшої розробки автоматизованих систем безконтактного екологічного моніторингу стічних вод підприємств харчової промисловості.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Запропонований авторами метод частотної стабілізації електромагнітної взаємодії безпосередньо пов'язаний із сучасними науковими та прикладними завданнями у сфері екологічного моніторингу стічних вод підприємств овочевої консервації. Авторський підхід ґрунтується на використанні трансформаторного електромагнітного перетворювача (ТЕП), який забезпечує безконтактну взаємодію змінного магнітного поля з контрольованим рідким середовищем та формування інформативного вторинного електромагнітного сигналу. Це дозволяє здійснювати контроль електрофізичних характеристик стічних вод без безпосереднього контакту вимірювальних елементів із рідиною. Наукова складова авторського доробку полягає у встановленні взаємозв'язку між питомою електропровідністю χ, фазовим зсувом φ, температурою t, pH та узагальненим параметром електромагнітної взаємодії Qt. Застосування частотної стабілізації дозволяє адаптувати робочий режим вимірювальної системи до зміни χ контрольованого середовища та підтримувати стабільні умови електромагнітної взаємодії. Запропонована калібрувальна емпірична залежність для pH розширює можливості комплексної інтерпретації результатів електромагнітного контролю саме для досліджуваних стічних вод овочевої консервації. Практична значущість отриманого доробку полягає у формуванні основи для створення автоматизованих засобів оперативного безконтактного екологічного моніторингу. Використання сукупності взаємопов'язаних інформативних параметрів дозволяє підвищити інформативність контролю та своєчасно виявляти зміни електрофізичного стану стічних вод. Запропонований підхід може бути адаптований до виробничих систем моніторингу підприємств харчової промисловості, де важливими є безперервність, оперативність та стабільність контролю параметрів водного середовища.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження у сфері контролю фізико-хімічних параметрів водних і рідинних середовищ значною мірою пов'язані із застосуванням електричних методів вимірювання. Зокрема, кондуктометричні підходи використовуються для оперативного визначення питомої електропровідності χ та оцінювання зміни електричних властивостей досліджуваних середовищ [1–4]. Показано, що використання електричних характеристик може бути ефективним інструментом експрес-контролю якості рідинних середовищ, а вдосконалення конструкції вимірювальних перетворювачів дозволяє підвищувати стабільність та інформативність отриманих результатів [1, 2]. Важливим напрямом досліджень є удосконалення кондуктометричних методів контролю для середовищ зі складним фізико-хімічним складом. Інваріантні кондуктометричні вимірювальні перетворювачі розглядаються як засіб підвищення достовірності визначення χ за умов впливу різних дестабілізуючих факторів [2]. Кондуктометричний контроль також застосовується для оцінювання яко-

сті води, зокрема під час визначення її електричних характеристик та контролю відповідності встановленим вимогам [3]. Комплексне використання кондуктометрії, потенціометрії та рефрактометрії розглядається як перспективний підхід до експрес-контролю водних середовищ і дозволяє отримувати додаткову інформацію про їх фізико-хімічний стан [4].

Окремий напрям становлять дослідження впливу електромагнітних факторів на властивості водних середовищ. В роботах [5, 6] розглянуто взаємодію води та електромагнітного випромінювання, а також біологічні ефекти електромагнітного впливу. Зазначені дослідження підтверджують складний характер взаємодії електромагнітного поля з водними та біологічними середовищами, що створює наукові передумови для подальшого використання електромагнітних характеристик як інформаційних параметрів під час контролю рідинних середовищ. Значна увага приділяється також розвитку безконтактних та вихрострумових вимірювальних перетворювачів. Застосування накладних перетворювачів у вихрострумовому контролі дозволяє реалізувати вимірювання без безпосереднього контакту чутливого елемента з об'єктом контролю [7, 9]. Такий принцип є особливо перспективним для дослідження агресивних, забруднених або хімічно нестабільних рідин, оскільки відсутність прямого контакту потенційно зменшує вплив поляризаційних та корозійних процесів на результати вимірювань. Для підвищення інформативності контролю важливим є також використання фазових характеристик електромагнітних сигналів, що розглядаються у фазовимірювальних системах неруйнівного контролю [8].

Окремий інтерес становлять багатопараметрові електромагнітні методи контролю стічних вод підприємств овочевої консервації. У роботі [10] запропоновано багатопараметровий підхід до визначення параметрів стічних вод таких підприємств із використанням електромагнітної взаємодії. Це підтверджує перспективність використання електромагнітних характеристик для комплексного оцінювання стану стічних вод із урахуванням особливостей їх багатокомпонентного складу. Разом із тим аналіз наведених досліджень показує, що основна увага у відомих роботах приділяється визначенню χ, потенціометричних характеристик або окремих параметрів електромагнітної взаємодії. Недостатньо розкритим залишається питання застосування частотної стабілізації електромагнітної взаємодії для безконтактного комплексного контролю стічних вод овочевої консервації при зміні їх температури t та електропровідності χ. Тому, перспективним напрямом є поєднання інформації про питому електропровідність χ, фазовий зсув φ, температуру t, pH та узагальнений параметр електромагнітної взаємодії Q_t в межах єдиного вимірювального підходу.

Таким чином, результати попередніх досліджень створюють теоретичне та експериментальне підґрунтя для розвитку безконтактних електромагнітних методів екологічного моніторингу. Водночас необхідність підвищення стабільності вимірювань при температурних змінах та забезпечення одночасного контролю декількох інформативних характеристик обґрунтовує доцільність подальшого дослідження методу частотної стабілізації електромагнітної взаємодії для стічних вод підприємств овочевої консервації.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття. Незважаючи на наявність досліджень у сфері електромагнітного та кондуктометричного контролю рідинних середовищ, недостатньо опрацьованим залишається питання безконтактного багатопараметрового контролю стічних вод підприємств овочевої консервації за умов одночасної зміни їх температури t, електропровідності χ та кислотно-лужних характеристик. Зокрема, потребує подальшого дослідження можливість використання параметрів вторинного електромагнітного сигналу для комплексного оцінювання стану стічних вод без застосування контактних електродів. Окремою невирішеною проблемою є забезпечення стабільності електромагнітної взаємодії при зміні температури t досліджуваного середовища. Зі зміною температури змінюється χ, що безпосередньо впливає на характер вихрових струмів та параметри вторинного електромагнітного сигналу. Тому використання сталої робочої частоти f може призводити до зміни умов електромагнітної взаємодії та, відповідно, до додаткової похибки контролю.

Також, недостатньо дослідженим залишається застосування автоматичної зміни частоти як засобу стабілізації узагальненого параметра електромагнітної взаємодії Q_t. Ще одним невирішеним аспектом є встановлення взаємозв'язку між узагальненим параметром електромагнітної взаємодії та водневим показником pH стічних вод. Для багатокомпонентних стічних вод овочевої консервації така залежність може мати специфічний характер і потребує експериментального калібрування. У зв'язку з цим актуальним є визначення емпіричної залежності, яка дозволяє використовувати зміну Q_t як додаткову інформаційну ознаку для оцінювання pH саме досліджуваного типу стічних вод.

Таким чином, потребує подальшого розвитку методика комплексного безконтактного контролю, яка поєднує інформацію про питому електропровідність χ, фазовий зсув φ, температуру t, pH та узагальнений параметр Q_t. Вирішення зазначених питань дозволить підвищити інформативність електромагнітного контролю та створити передумови для практичного застосування методу частотної стабілізації електромагнітної взаємодії в автоматизованих системах оперативного екологічного моніторингу стічних вод підприємств овочевої консервації.

Мета та завдання дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності екологічного моніторингу стічних вод овочевої консервації шляхом застосування методу частотної стабілізації електромагнітної взаємодії.

1. Дослідити закономірності електромагнітної взаємодії трансформаторного електромагнітного перетворювача (ТЕП) зі стічними водами овочевої консервації та встановити взаємозв'язок між питомою електропровідністю χ, температурою t, фазовим зсувом φ і узагальненим параметром Q_t.

2. Розробити та обґрунтувати метод частотної стабілізації електромагнітної взаємодії, який забезпечує підтримання сталого режиму вимірювального контролю при зміні t та χ стічних вод.

3. Отримати результати безконтактних вимірювань питомої електропровідності χ, температури t і pH зразка стічних вод

Новизна. Наукова новизна роботи полягає у розробленні та теоретичному обґрунтуванні методу частотної стабілізації електромагнітної взаємодії для безконтактного багатопараметрового контролю стічних вод овочевої консервації. Запропоновано принцип автоматичної зміни робочої частоти електромагнітного поля відповідно до зміни χ та t контрольованого середовища, що забезпечує підтримання сталого режиму електромагнітної взаємодії ТЕП зі зразком стічних вод. Запропоновано калібрувальну емпіричну залежність для оцінювання pH за зміною узагальненого параметра Q_t, коефіцієнт якої визначається експериментально для конкретного складу стічних вод овочевої консервації.

Загальнонаукове значення. Практична цінність отриманих результатів полягає у можливості подальшої адаптації запропонованого методу до автоматизованих систем оперативного екологічного моніторингу на підприємствах харчової промисловості. Запропонований підхід може бути використаний для безперервного контролю зміни електрофізичних параметрів стічних вод без безпосереднього контакту вимірювального перетворювача з контрольованим середовищем. Отримані результати можуть бути використані під час розроблення технічних засобів контролю параметрів стічних вод. Метод може бути інтегрований до складу автоматизованих вимірювальних комплексів для оперативного отримання інформації про стан контрольованого середовища. Використання запропонованого підходу створює передумови для підвищення оперативності контролю та своєчасного виявлення змін фізико-хімічних характеристик стічних вод.

Перспективи подальших досліджень. Перспективним напрямом подальших досліджень є перевірка запропонованого підходу для різних складів стічних вод, розширення діапазону контрольованих параметрів та оцінювання стабільності методу в умовах тривалого виробничого моніторингу. Окрему увагу доцільно приділити встановленню закономірностей впливу концентрації іонів та температури на інформативні характеристики електромагнітного сигналу. Перспективним є також удосконалення алгоритму автоматичної зміни робочої частоти з урахуванням одночасної зміни χ, фазового зсуву φ та pH контрольованого середовища. Важливим напрямом є експериментальне визначення калібрувальних коефіцієнтів для різних типів стічних вод та оцінювання відтворюваності отриманих результатів. Впровадження методу створює можливість оперативного виявлення змін стану стічних вод та своєчасного коригування режимів їх очищення.

Методика експерименту. Експериментальні дослідження виконували на лабораторних зразках стічних вод підприємства з виробництва консервованих огірків та овочевих маринадів, попередньо усереднених та профільтрованих від крупнодисперсних включень. Вимірювання питомої електропровідності χ, фазового зсуву φ, pH та температури t здійснювали за допомогою трансформаторного електромагнітного перетворювача (ТЕП) із радіусом робочої зони $a = 62 \cdot 10^{-3}$ м. Початкова частота збудження становила $f_0 = 20$ МГц, а струм у збуджувальній обмотці підтримували на рівні $I = 50$ мА. Температуру контрольованих зразків змінювали в інтервалі $t = 12–30$ ºС із використанням нагрівального модуля. Вимірювання проводили при послідовному підвищенні температури зразка з реєстрацією значень χ, φ та pH та узагальненого параметра електромагнітної взаємодії Q. Для врахування температурної залежності χ використовували температурний коефіцієнт $\alpha = 1{,}78 \cdot 10^{-2}$ 1/ºС. На початковому етапі досліджень встановлювали температуру t = 12 ºС та початкову частоту 20 МГц, після чого зі зміною t та χ контрольованого середовища здійснювали відповідне коригування робочої частоти відповідно до принципу частотної стабілізації електромагнітної взаємодії. Отримані результати використовували для встановлення закономірностей зміни фізико-хімічних параметрів стічних вод у досліджуваному діапазоні температур.

Результати та обговорення. Результати досліджень підтвердили наявність закономірної зміни фізико-хімічних характеристик стічних вод овочевої консервації під впливом температурного фактора. Встановлено, що підвищення температури контрольованого середовища супроводжується монотонним зростанням питомої електропровідності χ, що зумовлено зміною рухливості іонів у досліджуваному середовищі. Отримана залежність свідчить про виражену температурну чутливість електричних властивостей стічних вод та підтверджує можливість використання безконтактного електромагнітного перетворювача для їх оперативного контролю. На рис. 1 наведено схему установки для реалізації методу вимірювального контролю зразка стічних вод. До складу вимірювальної установки входять: генератор змінного сигналу Г, блок регулювання час-

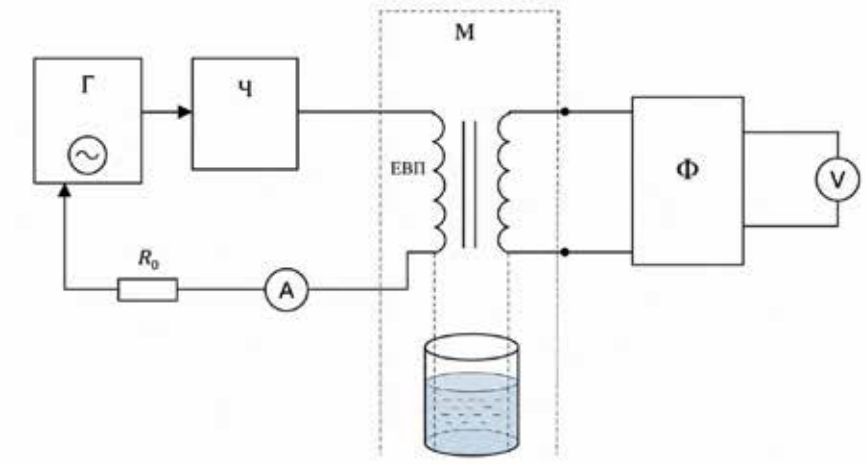


Рис. 1. Схема вимірювального контролю фізико-хімічних параметрів зразка стічних вод

тоти Ч, трансформаторний електромагнітний перетворювач (ТЕП), на схемі позначено буквою М, еталонний опір R_0, амперметр А, збуджувальна обмотка ЕВП, фазочутливий блок Ф та вольтметр V для вимірювання сумарної ЕРС E_Σ.

Принцип роботи установки полягає у формуванні високочастотного змінного магнітного поля, яке створюється генератором – Г та подається на – М. Під дією змінного магнітного поля у досліджуваному середовищі виникають вихрові струми, параметри яких залежать від електропровідності χ, температури t та pH у стічних водах овочевої консервації.

Еталонний опір R_0 та амперметр А забезпечують стабілізацію і контроль струму в колі збудження. Вторинний сигнал, який формується у вимірювальній обмотці ЕВП під дією електромагнітної взаємодії, надходить до фазочутливого блока Ф. За допомогою блока Ф визначається фазовий зсув між первинним та вторинним сигналами. Вольтметр V використовується для вимірювання ЕРС E_Σ, величина якої змінюється залежно від електрофізичних параметрів контрольованого середовища.

Особливістю запропонованого методу є стабілізація частоти електромагнітної взаємодії f при зміні параметрів стічних вод. Це дозволяє підтримувати сталий режим роботи вимірювальної системи та підвищувати точність безконтактного контролю.

Теоретичні основи методу. Запропонований метод базується на підтриманні сталого режиму електромагнітної взаємодії між змінним магнітним полем та електропровідним рідким середовищем.

Узагальнений параметр електромагнітної взаємодії визначається як:

$$Q_t = Q_0 = const \qquad (1)$$

де: Qt – узагальнений параметр при поточній температурі; Q0 – початкове значення параметра.

Для безконтактного електромагнітного контролю використовується узагальнений параметр взаємодії [5–8]:

$$Q_t = a\sqrt{\mu_0 \chi_t \omega} \qquad (2)$$

де: a – радіус контрольованого середовища; μ0 – магнітна стала; χt – питома електропровідність з урахуванням температури; ω = 2πf – кутова частота.

За умови стабілізації параметра Q_t отримуємо:

$$a\sqrt{\mu_0 \chi_0 \omega_0} = a\sqrt{\mu_0 \chi_t \omega_t} \qquad (3)$$

Після перетворення маємо:

$$\chi_0 \omega_0 = \chi_t \omega_t \qquad (4)$$

або:

$$\chi_0 f_0 = \chi_t f_t \qquad (5)$$

Звідси визначається поточна частота f_t:

$$f_t = f_0 \frac{\chi_0}{\chi_t} \qquad (6)$$

Таким чином, при зміні питомої електропровідності χ автоматично змінюється робоча частота системи f, що забезпечує стабільність електромагнітної взаємодії.

Температурна залежність χ визначається співвідношенням [7]:

$$\chi_t = \chi_0 \left[1 + \alpha\left(t - t_0\right)\right] \qquad (7)$$

де: α – температурний коефіцієнт електропровідності; t0 – початкова температура; t – поточна температура.

Підставляючи цей вираз у формулу частоти (6), отримаємо:

$$f_t = \frac{f_0}{1 + \alpha\left(t - t_0\right)} \qquad (8)$$

Отримане рівняння показує, що зі збільшенням t робоча частота системи f зменшується, що забезпечує стабілізацію електромагнітної взаємодії у контрольованому середовищі.

Фазовий зсув між первинним та вторинним сигналами визначається виразом:

$$\varphi_t = \arctan\left(\frac{R}{\omega L}\right) \quad (9)$$

де: L – еквівалентна індуктивність; R – активний опір контрольованого середовища.

Оскільки опір середовища залежить від χ:

$$R \sim \frac{1}{\chi_t} \quad (10)$$

то при збільшенні t та зростанні χ фазовий зсув φ також збільшується.

Узагальнений водневий показник *pH* розраховують за наступною формулою:

$$pH_t = pH_0 - k_{pH}(Q_t - Q_0) \quad (11)$$

де pHt – поточне значення водневого показника; pH0 – його початкове значення; Qt – поточне значення узагальненого параметра електромагнітної взаємодії; Q0 – початкове значення узагальненого параметра; kpH – емпіричний коефіцієнт чутливості pH до зміни Qt.

За результатами апроксимації експериментальних даних для досліджуваних стічних вод прийнято $k_{pH} = 2{,}29$. Запропонована залежність є калібрувальною емпіричною залежністю, встановленою для досліджуваного складу стічних вод овочевої консервації, і не розглядається як універсальна залежність для визначення pH (формула 11). Для стічних вод іншого складу значення коефіцієнта k_{pH} має визначатися експериментально.

У табл. 1 наведено результати визначення електричних та температурних параметрів зразка стічних вод у діапазоні зміни загальної концентрації іонів.

Аналіз отриманих результатів показує, що зі збільшенням температури спостерігається зростання питомої електропровідності χ_t та узагальненого параметра Q_t. Одночасно фазовий зсув φ_t також збільшується, що пов'язано зі зміною рухливості іонів та характеру електромагнітної взаємодії у контрольованому середовищі. Значення pH при цьому поступово зменшується, що свідчить про зміну іонного складу стічних вод при нагріванні. Отримані результати підтверджують ефективність використання методу частотної стабілізації електромагнітної взаємодії для безконтактного контролю фізико-хімічних параметрів стічних вод овочевої консервації.

Висновки. Проведені дослідження показали, що електромагнітна взаємодія трансформаторного електромагнітного перетворювача (ТЕП) зі стічними водами овочевої консервації є достатньо чутливою до зміни параметрів контрольованого середовища, що створює можливість використання інформативних характеристик вторинного сигналу. Встановлено, що запропонований принцип частотної стабілізації дає змогу компенсувати зміну електрофізичного стану середовища шляхом коригування робочого режиму вимірювальної системи. Такий підхід забезпечує більш сталі умови вимірювального контролю при зміні температури t та електропровідності χ. Експериментально підтверджено закономірне підвищення χ стічних вод зі зростанням t. У дослідженому діапазоні температур значення χ_t збільшилося від $8{,}29 \cdot 10^{-1}$ до $11{,}12 \cdot 10^{-1}$ См/м, що характеризує істотну залежність електричних властивостей середовища від температурного режиму. Виявлено відповідну зміну фазової характеристики електромагнітного сигналу: при підвищенні t приблизно від 12 до 30 ºС фазовий зсув збільшився від 6,53 до 8,46º. Це підтверджує можливість використання фазових параметрів як додаткових інформативних ознак під час оцінювання стану водного середовища. За результатами вимірювань встановлено поступове зниження pH від 6,90 до 6,52 при підвищенні t. Зміна цього показника разом із динамікою χ та φ, свідчить про комплексний характер електрофізичних перетворень у досліджуваному середовищі. Отримані значення узагальненого параметра Q_t, демонструють його зростання в усьому дослідженому температурному інтервалі. Це дозволяє розглядати узагальнений електромагнітний параметр Q_t, як додатковий

Таблиця 1

Результати визначення електричних та температурних параметрів зразка стічних вод: α = 1,78·10⁻² 1/ºС; t_0 = 12ºС; *a* = 62·10⁻³м; t = [12 … 30 ºС], I = 50 мА; f = 20 МГц

t, ºС	$\chi_t \cdot 10^{-1}$, См/м	φ_t, град	pH	Q_t
12,04	8,29	6,5286	6,90	0,9600
15,01	8,61	6,7964	6,74	0,9771
16,98	8,92	6,9734	6,71	0,9929
19,01	9,24	7,1899	6,69	1,0086
20,99	9,55	7,4035	6,67	1,0241
23,02	9,86	7,6182	6,63	1,0403
24,98	10,21	7,8304	6,60	1,0542
27,01	10,49	8,0491	6,58	1,0691
29,01	10,81	8,2538	6,55	1,0830
30,09	11,12	8,4608	6,52	1,0972

показник для комплексної характеристики змін електричних властивостей стічних вод. Відсутність безпосереднього контакту чутливих елементів із досліджуваною рідиною є важливою перевагою запропонованого підходу порівняно з контактними електродними методами. Це зменшує потенційний вплив поляризації та корозії електродів і створює передумови для тривалої роботи засобів контролю у складних водних середовищах. Сукупний аналіз питомої електропровідності χ, фазового зсуву φ, температури t, pH та узагальненого параметра Q_t, показує доцільність багатопараметрового підходу до оцінювання стану стічних вод. У свою чергу, використання декількох взаємопов'язаних характеристик підвищує інформативність контролю та розширює можливості інтерпретації результатів вимірювань.

Література

1. Мідик І.М., Лиса О.В. Оперативний контроль якості овочів за електричними характеристиками. *Вимірювальна техніка та метрологія.* 2018. Вип. 79. № 4. С. 17–24.
2. Походило Є. В., Плахтій Н. Л., Мартинович Н. В. Інваріантні кондуктометричні вимірювальні перетворювачі. Національний університет «Львівська політехніка». *Вимірювальна техніка та метрологія.* Львів. 2010. С. 83–87.
3. Брицун В.М., Останіна Н.В. Особливості кондуктометричного контролю якості дистильованої води для фармакопейних потреб. *Фармакологія та лікарська токсикологія.* 2018. № 2 (58). С. 97–103.
4. Кофанова О.В., Борисов О.О. Потенціометрія, кондуктометрія і рефрактометрія як методи експрес-контролю якості ґрунтів і поверхневих вод у зонах відпочинку людей. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету.* 2019. Т. 1, № 9. С. 1–18.
5. Савченко В.В., Синявський О.Ю., Бунько В.Я. Вплив магнітного поля на воду. *Енергетика і автоматика.* 2019. № 1. С. 6–15.
6. Баран Б.А., Бубенщикова Г.Т., Хрящевський В.М. Біологічна дія електромагнітного випромінювання. *Довкілля та здоров'я.* 2009. № 4. С. 43–46.
7. Кучерук В.Ю. Фотоелектричний вимірювальний перетворювач параметрів потоку молока. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології.* 2017. № 1. С. 66–71.
8. Маєвський С.М. Фазовимірювальні системи неруйнівного контролю: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 288 с.
9. Лисенко Ю.Ю., Куц Ю.В., Протасов А.Г., Дугін О.Л. Застосування накладних перетворювачів в імпульсному вихрострумовому контролі. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування.* 2016. Вип. 51. С. 58–63.
10. Себко В.В., Нус І.Б., Новожилова Т.Б. Багатопараметровий метод контролю параметрів стічних вод підприємств овочевої консервації. *Таврійський науковий вісник. Серія: Сільськогосподарські науки.* 2025. Вип. 146, ч. 2. С. 233–242.

Дата першого надходження статті до видання: 28.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

УДК 502.174:628.3]:005.591.1-047.44
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.37

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕНДЕНЦІЙ В СИСТЕМІ УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД У ПОЛТАВСЬКІЙ ОБЛАСТІ

Степова О.В. (orcid.org/0000-0002-6346-5484),
Фролов В.Ф. (orcid.org/0000-0003-1675-8476)
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
пр. Віталія Грицаєнка, 24, 36011, Полтава
alenastepovaja@gmail.com, frolov19470308@ukr.net

Вивчена динаміка утворення осадів стічних вод на найбільших підприємствах в Полтавській області. Зазначено, що поводження з осадами очищення стічних вод на промислових та комунальних підприємствах здебільшого залишаються «в тіні» проблеми забруднення водних ресурсів, а отже, й прийняття ефективних технологічних рішень з очищення стічних вод. Осади – невід'ємна частина будь-якої очисної системи. Відповідно до Закону України «Про водовідведення та очищення стічних вод» (2023) [1] осади стічних вод – це осади, що утворюються на очисних спорудах систем водовідведення в процесі очищення стічних вод. Таку воду можна довести до відповідних нормативних показників, але якщо осад належним чином не обліковується та не класифікований, не має безпечного маршруту перероблення, то підприємство ризикує здійснити вторинне забруднення, спричинити конфлікти з громадою, отримати штрафи. В окремих випадках – навіть зупинити виробництво [2]. У праці розглянуті, сформовані за останні 15 років, особливості щодо управління осадами стічних вод, здійснено критичний аналіз поточного стану поводження з осадами. Проведено SWOT-аналіз системи управління осадами стічних вод від комунальних очисних споруд. Означені ключові проблеми поводження з осадами стічних вод в рамках Полтавської області, які, власне, характерні й для інших регіонів України. У праці здійснено аналіз можливих шляхів та рішень у сфері управління осадами стічних вод, розроблено та запропоновано комплекс покрокових заходів, спрямованих на забезпечення відновлення та повторного використання осадів стічних вод, розвиток сфери управління осадами стічних вод від комунальних очисних споруд у цілому. Дослідження може стати корисним помічником для працівників у сфері управління відходами, органів місцевого самоврядування, а також впровадження стратегії циркулярної економіки в Україні. *Ключові слова:* осади стічних вод, управління відходами, регіон, охорона водних ресурсів.

Analysis of current trends in the waste management system for wastewater treatment in the Poltava region. Stepova O., Frolov V.

The issue of managing wastewater treatment sludge at industrial and municipal facilities largely remains overshadowed by concerns regarding water pollution and the selection of effective wastewater treatment technologies, which are the primary drivers of such pollution. At the same time, sludge is an integral part of any treatment system. According to the Law of Ukraine "On Water Discharge and Wastewater Treatment" (2023) [1]: wastewater sludge refers to sludge formed at wastewater treatment facilities during the wastewater treatment process. However, while water can be brought up to standard, if sludge is not properly accounted for and classified, and there is no safe route for its processing, the facility risks secondary pollution, conflicts with the community, fines, and production shutdowns [2]. This study examines trends in wastewater sludge management that have emerged over the past 15 years and conducts a critical analysis of the current state of wastewater sludge management. The dynamics of wastewater sludge generation at the largest enterprises – the primary sources of wastewater sludge in the Poltava region – are analyzed. A SWOT analysis of the sewage sludge management system from municipal wastewater treatment plants was conducted. Key issues in sewage sludge management within the Poltava region were identified, which are also characteristic of other regions of Ukraine. The study analyzes possible approaches and solutions in the field of sewage sludge management. The study develops and proposes a set of step-by-step measures aimed at ensuring the recovery and reuse of sewage sludge and the development of sewage sludge management from municipal wastewater treatment plants as a whole. The study is significant for the fields of waste management, local governance, and the implementation of a circular economy strategy in Ukraine. *Key words:* sewage sludge, waste management, region, water resources protection.

Постановка проблеми. В Україні одні із найбільших потужностей з водовідведення стічних вод, що підлягають очищенню, мають підприємства комунальної галузі. У Полтавській області утворення осадів стічних вод переважно пов'язане із очищенням побутових стічних вод, що містять залишки миючих засобів, жири та інші забруднювачі, а також діяльністю промислових підприємств, у т.ч. харчопереробної промисловості, де утворюються значні обсяги органічних та неорганічних відходів [3].

Однак на сьогодні, традиційні технологічні підходи, що використовуються на каналізаційних очисних спорудах України, морально застаріли. Зокрема, технологія очищення стоків, що застосовується, дуже складна в експлуатації, має невелику ефективність та велику питому вартість. При цьому метод

© Степова О.В., Фролов В.Ф., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

видалення відходів, що утворюються на каналізаційних очисних станціях, а саме осадів із первинних відстійників та після споруд біологічної очистки є застарілим та потребує відчуження значної площі земель під спеціальні місця їх видалення (мулові майданчики, ставки-випарники, поля фільтрації), що відповідно призводить до забруднення повітря, водних ресурсів та ґрунту [4].

На актуальності проблеми раціонального управління відходами «осади стічних вод» наголошується в низці законодавчих актів України, а також в Регіональному плані управління відходами у Полтавській області до 2033 року [3], зокрема, на необхідності пошуку ефективних сучасних технологій оброблення (відновлення) осадів стічних вод для отримання вторинних продуктів або енергії, що могло б зменшити екологічний слід та підвищити економічну ефективність управління відходами.

Таким чином, сформульована проблематика стосується не лише застосування необхідної технології оброблення осадів стічних вод, а й прийняття системних рішень задля ефективного управління даними відходами.

Актуальність дослідження. Значний вплив на стан поверхневих вод мають: урбанізовані території, де на фоні кліматичних змін порушуються правила утримання водоохоронних зон (самовільне будівництво на берегах водойм); скиди неочищених або недостатньо очищених поверхневих, виробничих, лікарняних та господарсько-побутових стічних вод, а також неналежне поводження з утвореним осадом стічних вод [4].

Основною проблемою, що потребує особливої уваги під час організації системи управління відходами «осади стічних вод від комунальних очисних споруд», – це відсутність відповідних потужностей в Україні, зокрема, у Полтавській області з перероблення таких відходів та переважність іхнього полігонного захоронення, розміщення на звалищах або інших місцях видалення. Крім того, осади стічних вод попередньо складуються на спеціальних майданчиках для їх зневоднення.

Відповідно головними загрозами, що можуть загострювати існуючі проблеми та призвести до виникнення нових у майбутньому, – це чинники санітарно-екологічного та соціально-економічного характеру, пов'язані із втратою осадів як потенційного ресурсу.

Метою цієї статті є аналіз поточної ситуації щодо утворення й поводження з осадами стічних вод у Полтавській області, визначення ключових проблем та можливих шляхів й рішень у сфері управління осадами стічних вод.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження тісно пов'язане з актуальними завданнями практики управління відходами в умовах трансформації українського екологічного законодавства та його адаптації до стандартів Європейського Союзу. Проведений SWOT-аналіз існуючої системи управління осадами стічних вод від комунальних очисних споруд на прикладі Полтавської області є науковим внеском у методологію оцінки ефективності системи управління відходами на регіональному рівні. Автори надають практичні рекомендації для місцевих органів влади та природоохоронних органів щодо можливих шляхів та рішень, спрямованих на модернізацію системи управління осадами стічних вод на місцевих рівнях та може бути внеском у впровадження стратегії циркулярної економіки в Україні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В рамках даної роботи був проведений огляд опублікованих досліджень, спрямованих на аналіз проблематики поводження з осадами стічних вод, особливу увагу з яких було приділено дослідженням, виконаним в рамках Полтавської області [2, 3, 4, 6, 7].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.

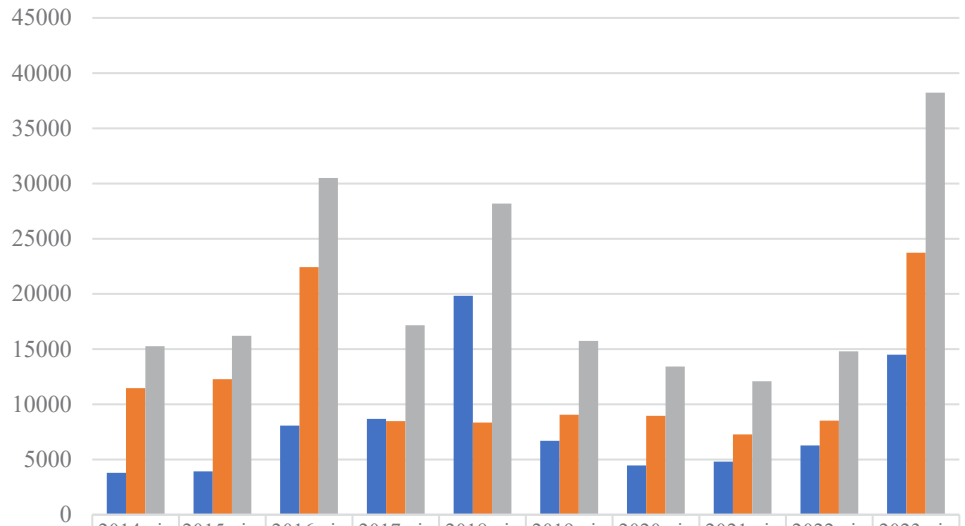
Аналіз стану діючої системи управління осадами стічних вод для Полтавської області був виконаний на завершальному етапі розроблення, оприлюднення та обговорення Регіонального плану управління відходами у Полтавській області на період до 2033 року [3]. У Регіональному плані виділена проблематика неефективного управління осадами стічних вод від комунальних очисних споруд, але не запропонована покрокова методологія модернізації системи управління осадами, яку можна покласти в основу місцевих планів управління відходами на рівні територіальних громад та їх об'єднань (кластерів).

Наукова новизна статті полягає в детальному аналізі існуючої практики управління осадами стічних вод від комунальних очисних споруд, застосуванні методу SWOT-аналізу для виділення перспективних кроків для розвитку системи управління осадами стічних вод.

Методологічне або загальнонаукове значення. Під час підготовки матеріалів наукової праці використовувалися методи систематизації та порівняльного аналізу зібраних статистичних даних, SWOT-аналізу та узагальнення й експертного оцінювання отриманих аналітичних результатів.

Викладення основного матеріалу. Аналіз щорічних обсягів утворення осадів стічних вод від комунальних очисних споруд здійснено на основі даних Головного управління статистики у Полтавській області [5] та даних затвердженого Регіонального плану управління відходами у Полтавській області [3]. Динаміка зміни утворення обсягів стічних вод від комунальних очисних споруд за 2014-2023 р. приведена на рис. 1.

Згідно з Наказом Державної служби статистики України від 23 січня 2015 року № 24, зокрема «Переліку категорій відходів за матеріалом», до оса-



	2014 рік	2015 рік	2016 рік	2017 рік	2018 рік	2019 рік	2020 рік	2021 рік	2022 рік	2023 рік
Обсяг промислових стоків, т	3798,9	3927,3	8078,1	8687,6	19833,4	6691,7	4459,7	4808,6	6273,6	14495,4
Звичайний осад, т	11463,54	12281,81	22430,49	8479,05	8350,8	9055,67	8962,35	7281,83	8520,8	23728,7
Осади стічних вод, т	15262,47	16209,12	30508,61	17166,69	28184,2	15747,36	13422	12090,44	14794,43	38224,14

Рис. 1. Динаміка утворення осадів стічних вод, т

Джерело: за даними Головного управління статистики у Полтавській області

дів стічних вод від комунальних очисних споруд відносять наступні відходи: 03.2 – осад промислових стоків, 11 – осад звичайний. Динаміку обсягів утворення осадів стічних вод даних категорій у період 2014–2023 роки наведено на рис. 1.

До загальної тенденції збільшення обсягів утворення осадів стічних вод від комунальних очисних споруд за 2014 – 2023 роки, суттєвий вклад здійснює осад звичайний, на який припадає від 30 до 75% від загального обсягу утворення осадів стічних вод за досліджуваний період.

До осадів стічних вод від комунальних очисних споруд входять такі групи відходів за основним небезпечним складником:

0204 – відходи, що містять кремній та його сполуки (за виключенням хлорсиланів і кремнійорганічних мономерів);

1501– відходи від очищення промислових та комунальних стічних вод;

1801 – інші відходи, що мають небезпечні властивості.

В результаті аналізу динаміки обсягів загального утворення осадів стічних вод за основним небезпечним складником, з'ясовано, що найбільша частка припадає на осади промислових та комунальних стічних вод (група відходів 1501), що в середньому близько 60% від загального обсягу утворення осадів за досліджуваний період, та характер їх утворення має тенденцію до збільшення.

Осад промислових стоків та звичайний осад утворюються переважно від наступних видів економічної діяльності: група 77 – відходи діяльності установ громадського харчування, технічного обслуговування та ремонту устаткування, приладів та виробів інших, відходи комунальні та аналогічні неспецифічні промислові інші; група 901 – відходи від функціонування обладнання для оброблення відходів та установок для очищення вод стічних.

Найбільшими джерелами утворення осадів стічних вод від комунальних очисних споруд є підприємства: КП «Кременчукводоканал» Кременчуцької міської ради; КП «Виробниче управління водопровідно-каналізаційного господарства Горішньоплавнівської міської ради»; Гоголівська центральна база обслуговування ПАТ «Укрнафта»; ТОВ «Пирятинський сирзавод» [6].

Система управління здійснюється самими підприємства ВКГ в рамках технологічного регламенту, а саме зневоднення на мулових майданчиках, де осади зберігаються протягом тривалого часу.

За досліджуваний період 2014-2023 роки основними напрямами поводження з осадами стічних вод від комунальних очисних споруд, є [5]:

– R5 – рециркуляція/утилізація інших неорганічних матеріалів;

– R10 – оброблення ґрунту, що позитивно впливає на землеробство, поліпшуючи екологічну обстановку;

– D1 – поховання в землі чи скидання (звалювання) на землю (на звалище тощо);

– D5 – скидання на спеціально обладнані звалища (на полігонах);

– D4 – скидання у поверхневі (як правило, штучні) водойми (розміщення рідких або шламоподібних відходів у котлованах, ставках-накопичувачах, відстійних басейнах, тощо).

Переважними напрямами поводження з осадами стічних вод від комунальних очисних споруд є:

D5 – скидання на спеціально обладнані звалища (на полігонах) – 20-45% від загального обсягу утворення;

D4 – скидання у поверхневі (як правило, штучні) водойми (розміщення рідких або шламоподібних відходів у котлованах, ставках-накопичувачах, відстійних басейнах, тощо) – 1,5 – 50% від загального обсягу утворення.

Аналізуючи особливості поводження з осадами стічних вод протягом 2014-2023 років, необхідно відмітити наступне [5, 6]:

– динаміка обсягів відновлення осадів стічних вод має тенденцію до збільшення і у 2023 році склала 43,66% від загального обсягу їх утворення, а у 2014 році відповідний показник становив лише 6,68%;

– динаміка обсягів видалення даного виду відходу у середньому складає 47% протягом 2014-2023 років, найбільше у 2022 році – 67%, а найменше у 2014 році – 32,35% (рис. 2).

Зважаючи на те, що переважними напрямками поводження з осадами стічних вод від комунальних очисних споруд залишається скидання на спеціально обладнані звалища (полігони) та розміщення у котлованах, ставках-накопичувачах, відстійних басейнах, тощо, відповідно основними інфраструктурними об'єктами поводження з даними відходами є комунальні підприємства, що здійснюють свою діяльність у сфері водовідведення та санітарного обслуговування населених пунктів та обслуговують місця видалення відходів, на які видаляється осад стічних вод від комунальних очисних споруд. Однак попередньо осади стічних вод складуються на спеціальних майданчиках для їх зневоднення.

До основних інфраструктурних об'єктів управління осадами стічних вод в Полтавській області відносяться [6]:

– *мулові майданчики:* Філія УПГГК АТ «Укргазвидобування» (с. Селещина); КП «Лубниводоканал», КП ВУВКГ Горішньоплавнівської міської ради Полтавської області; КП «Кременчукводоканал»; НГВУ «Полтаванафтогаз» ПАТ «Укрнафта» (с.Качанове); НГВУ «Полтаванафтогаз» ПАТ «Укрнафта» (селище Гоголево);

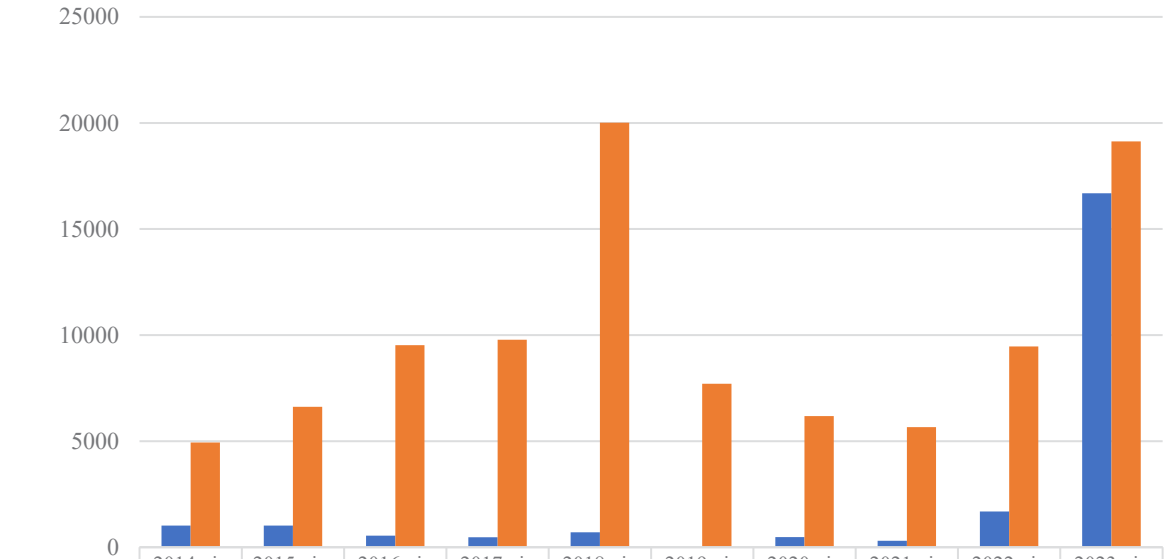
– *ставки-випарники:* Філія УПГГК АТ «Укргазвидобування» (с.Сухоносівка); НГВУ «Полтаванафтогаз» ПАТ «Укрнафта» (с.Качанове);

– *поля фільтрації*: Філія ГПУ «Полтавагазвидобування» АТ «Укргазвидування» (Тимофіївське УСП, с.Плішивець); виробничий підрозділ «Редутський кар'єр» (500 м на північний схід від Редутського щебеневого заводу); ПАТ «Пирятинський м»ясокомбінат» (м.Пирятин);

– *площадки компостування*: КП «Полтавааводоканал» (Супрунівська сільська рада); КП «Полтавааводоканал» (с. Затурино).

Аналіз статистичних даних щодо утворення осадів стічних вод свідчить про наступне [5, 6]:

– обсяги промислових осадів варіюються від найвищого значення 19833,4 тонн у 2018 році до найнижчого у 3798,9 тонн у 2014 році, що може вказувати на нестабільність у промисловому вироб-



	2014 рік	2015 рік	2016 рік	2017 рік	2018 рік	2019 рік	2020 рік	2021 рік	2022 рік	2023 рік
Відновлено	1019,19	1018,61	545,74	469,13	703,6	11,23	479,37	308,2	1682,56	16686,85
Видалено	4937,51	6616,93	9529,14	9784,96	20011,03	7703,49	6179,6	5658,93	9468,16	19133,99

Рис. 2. Динаміка управління осадами стічних вод, т

Джерело: за даними Головного управління статистики у Полтавській області

ництві, а також на непередбачуваність в управлінні даними відходами, а отже створює додаткові ризики для ефективного управління ними;

– значним ризиком є високий рівень накопичення осадів на мулових майданчиках, що знаходяться на території Полтавської області. Таке накопичення може призводити до перевантаження існуючої інфраструктури, що збільшує ризик витоків або аварій, особливо у разі надмірних опадів або інших несприятливих погодних умов. Це, в свою чергу, може спричинити забруднення ґрунтових вод, що є серйозною екологічною загрозою;

– вилучення осадів на звалища побутових відходів, хоч і дозволяє зменшити обсяги відходів, що потребують обробки, все ж не є стійким з точки зору довгострокового управління відходами, так як звалища самі є джерелами забруднення повітря, води та ґрунту, особливо у разі порушення технологій захоронення та їх перевантаження;

– відсутність застосування ефективних технологій обробки осадів стічних вод означає втрату можливостей продукування вторинних продуктів або енергії, що могло б зменшити екологічний слід та підвищити економічну ефективність управління відходами.

Таким чином, аналізуючи вище наведені дані щодо стану системи управління осадами стічних вод від комунальних очисних споруд із застосуванням методу SWOT-аналізу можна виділити наступне (табл. 1).

Виходячи із результатів SWOT-аналізу, базовими проблемами, що потребують першочергового вирішення при організації системи управління осадами стічних вод від комунальних очисних споруд є відсутність потужностей з перероблення даних відходів й відповідне їх видалення. При цьому відбувається негативний вплив на усі компоненти довкілля та втрачається потенційний енергетичний ресурс.

У той же час згідно Директиви Ради 91/271/ЄЕС «Про очистку міських стічних вод» осад повинен оброблятися та за можливості повторно використовуватись. Відповідно постає питання пошуку можливих шляхів та ефективних рішень для розвитку сфери управління осадами стічних вод.

В даній роботі систематизовані й запропоновані рішення, покрокове виконання яких зможе забезпечити ефективне управління осадами стічних вод від комунальних очисних споруд не лише у Полтавській області, а й в інших регіонах України:

1) забезпечення комунальними підприємствами ведення первинного обліку обсягів утворення осадів стічних вод та здійснення постійного контролю за веденням даного обліку відповідно до діючого «Порядку первинного обліку обсягів утво-

Таблиця 1

Сильні сторони	Слабкі сторони
Наявність спеціалізованих комунальних підприємств, що здійснюють очищення стічних вод. Стабільна система надання послуг та контролю за обсягами водовідведення. Інтенсивне оснащення мережі централізованого водозабезпечення приладами контролю за обсягами водоспоживання й відповідно водовідведення. Зниження в останні роки обсягів централізованого водовідведення.	Зростання обсягів утворення осадів стічних вод від комунальних очисних споруд при одночасній відсутності чіткого контролю за фактичними обсягами утворення осадів. Відсутність потужностей з оброблення (відновлення) осадів стічних вод. Відсутність об'єктивної інформації щодо обсягів відкачування побутових стічних вод на об'єктах децентралізованого водовідведення, особливо які обслуговуються приватними підприємствами. Спеціалізовані площадки для накопичення осадів (мулу) потребують значних за площею земельних ділянок, які є постійним джерелом забруднення грунту, поверхневих і підземних вод та атмосфери такими небезпечними речовинами як сірководень, аміак, продукти гниття білків тощо. Недосконаліть методики визначення фізико-хімічного складу осадів стічних вод, що не дозволяє об'єктивно оцінити рівень забрудненості осаду патогенною мікробіотою та життєздатними яйцями гельмінтів, що потребує додаткового знешкодження й відповідно здорожує процес використання осаду, як добрива для рослин. Втрата ресурсу, що має високий енергетичний потенціал для подальшого відновлення та може використовуватися в сільському господарстві.
Можливості	**Загрози**
Залучення механізмів пільгового кредитування у сферу поводження з осадами стічних вод. В рамках євроінтеграційного процесу поетапне вдосконалення національного законодавства, яке регулює сферу управління осадами стічних вод. Наявність світового досвіду та технологій відновлення осадів стічних вод.	Недосконаліть існуючої системи контролю за об`єктами поводження з осадами стічних вод. Значні фінансові витрати на розвиток сфери відновлення осадів стічних вод. Відсутність зацікавленості внутрішніх інвесторів у розвитку технологій відновлення осадів стічних вод. При відсутності технологій обробки осаду, що вже накопичився на мулових майданчиках, та осаду, що утворюється, є ризик виникнення небезпечної екологічної ситуації у місцях складування. Відсутність площ вільних земель для складування осаду. Відсутність досвіду проведення систематичного цільового моніторингу якості осаду задля визначення перспектив його подальшого використання.

рення, обробки, зберігання та повторного використання осадів стічних вод», затвердженого Наказом Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України 17 липня 2024 року № 643;

2) провести інвентаризацію загальних обсягів осадів стічних вод, що накопичені на майданчиках зневоднення;

3) виконати науково обґрунтоване прогнозування щорічних обсягів утворення осадів стічних вод від комунальних очисних споруд;

4) провести дослідження фізико-хімічного складу осадів стічних вод, що дозволить об'єктивно оцінити ресурсний потенціал осадів та обрати оптимальні шляхи їх подальшого відновлення;

5) для діючих очисних споруд виконати техніко-економічне обґрунтування прийняття технологічних рішень з оброблення та відновлення свіже утворюваних осадів відповідно прогнозованих річних обсягів;

6) запровадити технологію оброблення та відновлення утворюваних осадів, яка є оптимальною для кожної з очисних споруд з урахуванням місцевих умов;

7) провести дослідження можливих напрямів повторного використання оброблених осадів стічних вод на кожному із місцевих рівнів;

8) забезпечити постійний облік обсягів оброблення, зберігання та повторного використання осадів стічних вод згідно вимог Наказу Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України 17 липня 2024 року № 643;

9) забезпечити періодичний контроль дотримання нормативів якості осадів стічних вод, що спрямовуються на повторне використання;

10)провести рекультивацію та повернення в обіг земель після відновлення осадів, що були накопичені на майданчиках зневоднення очисних споруд;

11)розробити план відновлення осадів очисних споруд;

12)включити у місцеві програми у сфері водовідведення питання плану відновлення осадів очисних споруд відповідно до вимог Закону України «Про водовідведення та очищення стічних вод» (ст.13) та вимог «Порядку повторного використання очищених стічних вод та осаду стічних вод за умови дотримання нормативів гранично допустимих концентрацій забруднюючих речовин», затвердженого Наказом Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України 12 грудня 2018 року № 341.

Головні висновки. здійснений аналіз поточної ситуації щодо утворення й поводження з осадами стічних вод на прикладі Полтавської області, дозволив виділити ключові проблеми у сфері управління осадами стічних вод від комунальних очисних споруд.

SWOT-аналіз існуючої системи управління осадами стічних вод від комунальних очисних споруд на прикладі Полтавської області є науковим внеском у методологію оцінки ефективності системи управління відходами на регіональному рівні.

У роботі розроблено та запропоновано комплекс покрокових заходів, спрямованих на забезпечення відновлення та повторного використання осадів стічних вод й розвиток сфери управління осадами стічних вод від комунальних очисних споруд у цілому.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати даної роботи мають прикладний характер. Зокрема, розроблено комплекс покрокових заходів, спрямованих на забезпечення відновлення та повторного використання осадів стічних вод, що можуть бути використані на стадії розроблення й реалізації місцевих програм у сфері водовідведення.

Література

1. Закон України «Про водовідведення та очищення стічних вод». URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2887-20#Text (дата звернення: 06.05.2026).
2. Осади й шлами очисних споруд: що з ними робити, як уникнути проблем і створити додану вартість. URL: https://ukraine-oss.com/osady-j-shlamy-ochysnyh-sporud-shho-z-nymy-robyty-yak-unyknuty-problem-i-stvoryty-dodanu-vartist/ (дата звернення: 06.05.2026).
3. Регіональний план управління відходами у Полтавській області до 2033 року. URL: https://media.poda.gov.ua/docs/kzgb2qdd/regplan-eco-2025.pdf.
4. Зоріна, О.В., Маврикін, Є.О. Сучасні підходи до обробки та утилізації вторинних осадів господарсько-побутових стічних вод. *Меліорація і водне господарство.* 2021, № 2. С. 55-68. DOI: https://doi.org/10.31073/mivg202102-301
5. Офіційний сайт Головного управління статистики у Полтавській області. URL: https://www.pl.ukrstat.gov.ua/ (дата звернення: 06.05.2026).
6. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Полтавській області у 2024 році. Полтава, 2025. URL: https://drive.google.com/file/d/1nQT2OYEzTpQi5bbbVQTg2dl7crD89haA/view (дата звернення: 06.05.2026).
7. Регіональний план управління відходами у Полтавській області до 2030 року: проєкт. URL: https://www.adm-pl.gov.ua/advert/oprilyudnennya-dlya-obgovorennya-proektu-regionalniy-plan-upravlinnya-vidhodami-u-poltavskiy- (дата звернення: 06.05.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 24.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

УДК 628.353;5532.546; 532.542
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.38

ФОРМУВАННЯ БІОПЛІВКИ ПРИ ОЧИЩЕННІ СТІЧНИХ ВОД В БІОРЕАКТОРАХ ІЗ ЗАКРІПЛЕНИМ БІОЦЕНОЗОМ

Телима С.В. (orcid.org/0000-0003-0109-0696),
Дятел О.О. (orcid.org/0000-0002-1258-7561)
Інститут гідромеханіки Національної академії наук України
вул. Марії Капніст, 8/4, 03057, Київ
sertelyma@gmail.com, alexandr_dyatel@ukr.net

Вивчено основи та представлено математичну модель формування структури біоплівки з урахуванням її неоднорідності за товщиною, сталої та змінної пористості в стаціонарних і нестаціонарних умовах, а також впливу різних гідродинамічних факторів під час аеробного очищення стічних вод в біореакторах. Враховується наявність інертної біомаси та полімерних речовин. Значну увагу приділено дослідженню впливу неоднорідності біоплівки на процеси масопереносу. Крім аналізу основних факторів, проведено кореляційні співвідношення для побудови математичної моделі очищення стічних вод з використанням біоплівок. Зазначено, що для практичних розрахунків очищення стічних вод запропоновано одновимірну модель однорідної біоплівки з урахуванням отриманих оцінок та обмеження її використання. Порівняння результатів розрахунків з експериментальними даними засвідчило, що така однорідна модель у багатьох випадках добре узгоджується з експериментальними. Запропоновано деякі рекомендації відносного визначення форми поверхні біоплівок. Підтверджено, що ефективність біологічних методів видалення забруднюючих речовин різного походження, зокрема органічних сполук (ОС) і азоту (N), у різних біореакторах можна підвищити за рахунок організації на поверхні додаткового завантаження фіксованого біоценозу з високою концентрацією мікроорганізмів (біоплівка). Зазначено, що на початку очищення стічних вод відбувається значне зростання біоплівки, що потім інтенсивно зменшується, що також призводить до значних змін у перерозподілі біомаси. Формування товщини біоплівки з плином часу при великому і низькому співвідношенні ОС/N відбувається протягом близько 10 діб. Аналіз теоретичних досліджень засвідчив, що екстракція субстрату в основному відбувається в поверхневій частині біоплівки, що становить 20-25% від загальної товщини біоплівки. *Ключові слова:* біоплівка, біомаса, математична модель, масоперенос, дифузія, неоднорідність, біоценоз, стічні води.

About the process forming of the biofilm at the wastewater treatment in bioreactors with fixed biocenosis. Telyma S., Diatel O.
The article develops a model for improving the formation structure of a biofilm, considering its thickness heterogeneity with constant and variable porosity under steady-state and transient conditions during aerobic wastewater treatment, and taking into account the influence of various hydrodynamic factors on its operation. The presence of other substances, including inert biomass and polymeric substances, is considered. Significant attention is paid to studying the influence of biofilm heterogeneity on mass transfer processes. In addition to analyzing the main factors, correlation relationships are established for constructing a mathematical model of wastewater treatment using biofilms. It is shown that for practical calculations of wastewater treatment a one-dimensional model of a homogeneous biofilm is proposed considering the estimates obtained and the limitations of its use. Comparison of the calculation results with experimental data showed that such a homogeneous model often agrees well with the experimental results. Some recommendations regarding the determination of the biofilm surface shape are proposed. It can be concluded that the efficiency of biological methods for removing pollutants of various origins, particularly organic compounds and nitrogen (N), in various bioreactors can be increased by organizing a fixed biocenosis with a high concentration of microorganisms (biofilm) on the surface of an additional packing material. It has been established that at the beginning of wastewater treatment, there is a significant increase in biofilm, which then decreases rapidly, leading to significant changes in biomass redistribution. The formation of biofilm thickness over time at high and low OC/N ratios occurs over approximately 10 days. Overall, an analysis of theoretical studies has shown that substrate extraction occurs primarily in the surface layer of the biofilm, which accounts for approximately 20–25% of the total biofilm thickness. *Key words:* biofilm, biomass, mathematical model, mass transfer, diffusion, heterogeneity, biocenosis

Вступ. За останні роки в Україні різко погіршився екологічний стан водного середовища. Інтенсивне навантаження на нього, пов'язане з неконтрольованим забрудненням різного походження в річковій мережі, водоймах і водоносних горизонтах, істотно знизило якість питної води, а в окремих регіонах держави виник дефіцит водних ресурсів, придатних для водопостачання населенню. З іншого боку, війна з росією створила додаткове техногенне навантаження на всю екосистему нашої держави в цілому. Отже, виникає необхідність у будівництві та впровадженні сучасних технологій очищення стічних вод на об'єктах різного профілю, що сприятиме поліпшенню екології в Україні у післявоєнний час. Одним із способів поліпшенню ситуації зі стічними водами, які забруднюють водне середовище, є їх очищення. Зараз найбільш ефективним методом є біологічне очищення з використанням біореакторів різної конструкції.

© Телима С.В., Дятел О.О., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Актуальність проблем очищення стічних вод сьогодні безсумнівна. Багато наукових праць і практичних рекомендацій присвячено різним аспектам вирішення розглянутих питань, наприклад, [2, 4, 8, 9, 10] та ін.

Проведено аналіз впливу деяких гідродинамічних процесів та біохімічних перетворень на характеристику та структурні особливості біоплівки при очищенні стічних вод у біореакторах різних конструкцій. Розглянуто різні типи біоплівки та основні її параметри, які характеризують її структуру та можливість експлуатації.

Мета дослідження. Обґрунтування та розробка основних співвідношень для створення математичних моделей формування біоплівки, зокрема, її товщини з постійною та змінною пористістю при стаціонарних та нестаціонарних режимах експлуатації для більш ефективного очищення стічних вод від забруднень у біореакторах різних конструкцій.

Матеріали та методи. Дослідження проводились із використанням аналітичних та чисельних методів і експериментальних даних і з використанням персональних комп'ютерів.

Математична модель. При теоретичному обґрунтуванні процесів біоочистки стічних вод у біореакторах часто розглядається модель очистки із закріпленим біоценозом та з неоднорідною біоплівкою. За таких умов використовується добре відоме рівняння утилізації органічних забруднювачів з одним обмежувальним субстратом для стаціонарних умов [2, 4, 7]:

$$D_L(z)\frac{d^2L}{dz^2}+D_{L1}\frac{dL}{dz}-\frac{\mu_{\max}X_L}{Y}\cdot\frac{L}{K_{m_L}+L}=0 \qquad (1)$$

де, DL – коефіцієнт ефективної дифузії в біоплівці, L – концентрація забруднення, XL – концентрація мікроорганізмів, μmax – питома максимальна швидкість росту мікроорганізмів, Y – стехіометричний коефіцієнт приросту біомаси, KmL – коефіцієнт напівнасичення, z – координата, направлена перпендикулярно вниз відносно поверхні біоплівки.

Це рівняння балансу відносно швидкості використання субстрату в умовах нелінійної кінетики реакції Моно.

У запропонованій математичній моделі стратифікованої біоплівки за результатами проведеного аналізу прийнято наступне [4, 7, 10]:

1) Зв'язок між ефективним коефіцієнтом дифузії D_L та щільністю біоплівки X_L

$$\frac{D_L}{D_w}=1-\frac{0.43\cdot X_L^{0.92}}{11.19+0.27\cdot X_L^{0.99}} \qquad (2)$$

де Dw – коефіцієнт дифузії в чистій воді, см2/с.

Для цього випадку мінімальна концентрація субстрату, при якій немає стабільної біоплівки і нижче якої потік субстрату дорівнює нулю, можна визначити за наступною формулою:

$$S_{\min}=\frac{k_dK_s}{(\mu_{\max}-k_d)}, \qquad (3)$$

тут $\mu_{\max}, k_d, K_s$ – відомі параметри моделі.

При реалізації запропонованої моделі в Таблиці 1 приводяться наступні результати по визначенню товщини біоплівки L_f при різних концентраціях біомаси X_f

Крім того, у приведених роботах показано результати розрахунків потоку *I (мг/см².с)* при різних концентраціях субстрату в реакторі S_0 та концентраціях біомаси X_f.

Як видно з прикладів, в цілому процеси вилучення субстрату залежать від концентрації мікроорганізмів у біоплівці. Однак, при значних концентраціях X_f відбувається деяке зменшення субстрату у ньому. Це можна пояснити тим, що відповідно до рівняння (2) має місце значне зниження коефіцієнта дифузії, а процеси екстракції субстрату більшою мірою контролюються процесами масообміну та мають більший вплив порівняно з концентрацією X_f.

Наприклад, на рис. 1 показано зміну внутрішньої пористості під час росту біоплівки відповідно для випадків А та В з високими та малими концентраціями (L=300 гБПК/м³, N=30 г/м³) і (L=30 гБПК/м³, N=30 г/м³), що відповідає високому та низькому відношенню ОС/N. Водночас зазначається, що зміна внутрішньої пористості в біоплівці під час її росту суттєво залежить від розподілу біомаси, а саме, від розташування нерозчинених компонентів. Зміна внутрішньої пористості (її зменшення) під час росту біоплівки в обох випадках залежить від градієнта внутрішньої пористості по довжині біоплівки і збільшується з часом. Вказане зростання показує,

Таблиця 1

Значення товщини біоплівки $L_f=f(X_L,S_0)$ згідно з [1, 2]

X_f **mg/см³**	$S_0=0,02$ **m²/cm³** L_f **, cm**	$S_0=0,04$ **m²/cm³** L_f **, cm**	$S_0=0,06$ **m²/cm³** L_f **, cm**	$S_0=0,08$ **m²/cm³** L_f **, cm**	$S_0=0,10$ **m²/cm³** L_f **, cm**	$S_0=0,01$ **m²/cm³** L_f **, cm**
5	0,055	0,068	0,072	0,078	0,083	0,045
15	0,028	0,034	0,038	0,041	0,043	0,022
25	0,018	0,023	0,025	0,030	0,028	0,014
50	0,009	0,013	0,014	0,016	0,017	0,010

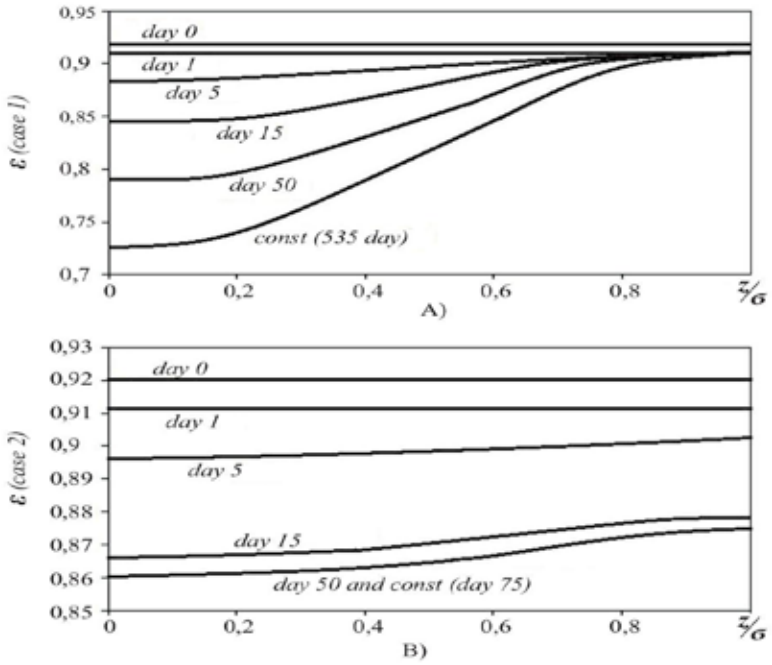


Рис. 1. Зміни внутрішньої пористості біоплівки під час її росту: (А) – велике співвідношення ОС/N; (В) – мале співвідношення ОС/N

що прийнятий режим масопереносу (коефіцієнт дифузії) враховується залежністю (2) під час росту біоплівки. Також зазначається, що розподіл біомаси та зміна внутрішньої пористості у випадку А добре узгоджуються з експериментальними даними.

При рішенні рівняння (1) було прийнято ряд умов, зокрема, те, що субстрат транспортується шляхом дифузії та використовується мікроорганізмами відповідно до відомого кінетичного рівняння Моно. Ефективну дифузію та щільність біоплівки можна розрахувати на межі кожного шару стратифікованої біоплівки, а процес у біоплівці можна розглядати в стаціонарних умовах. Крім того, субстрат переноситься в перпендикулярному напрямку щодо поверхні біоплівки, яка формується на непроникній і неактивній поверхні. Ми також припускаємо, що забруднення транспортуються до її нижньої поверхні лише шляхом дифузії. Окрім того, приймається, що однорідна біоплівка має ефективний коефіцієнт дифузії, що дорівнює його середньому значенню для стратифікованої біоплівки.

У теоретичних дослідженнях прийнято, що біоплівка складається з двох частин, а саме рідкої фази, в якій розчинені речовини переносяться шляхом молекулярної дифузії, і твердої частини. Концентрацію нерозчинених речовин і щільність біоплівки можна виразити наступним рівнянням [2, 4, 5, 6]:

$$\varepsilon = \varepsilon_P = 1 - \sum_{1}^{n_x} \frac{X_i}{\rho_i} \qquad (4)$$

ε – коефіцієнт внутрішньої пористості біоплівки.

$$\varepsilon_P + 1 - \sum_{i=1}^{n_x} \varepsilon_{Ti} = 1, \quad \varepsilon_{Ti} = \frac{X_i}{\rho_i} = \frac{M_{Fi}}{V_F} \cdot \frac{1}{\rho_i}, \qquad (5)$$

ε_P – відносний об'єм рідкої фракції, ε_{Ti} – відносний об'єм твердих речовин у нерозчиненому вигляді, n_i – кількість твердих компонентів, ρ_i – щільність компонента (маса на одиницю об'єму компонента).

Концентрація кожного компонента X_i визначається як:

$$X_i = \frac{M_{Fi}}{V_F}, \qquad (6)$$

де M_{Fi} – маса компонента, V_F – загальний об'єм біоплівки, тобто. об'єм рідкої та твердої фази в цілому.

Щільність кожного компонента ρ_i (маса на одиницю об'єму частинки даного компонента) пов'язана з щільністю біоплівки ρ_m наступним рівнянням:

$$\rho_m = \sum_{i=1}^{n_x} \varepsilon_{Ti} \rho_i = \frac{\sum M_{Fi}}{V_F}, \qquad (7)$$

Якщо біомаса в біоплівці є однорідною, то ми маємо:

$$\rho_i = const = \rho_m \left(1 - \varepsilon_p\right) \qquad (8)$$

Зауважимо, що в цілому вирішення задач, пов'язаних з біологічним очищенням стічних вод від різних забруднювачів за допомогою біотехнологій передбачає різний підхід та відповідний вибір моделі структури біоплівки.

Особливості формування товщини біоплівки та її поверхні. На основі аналізу існуючих літе-

ратурних джерел, а також отриманих результатів досліджень зроблено наступний загальний висновок, що при розробці та використанні моделей біоплівок достатньо обмежитися розглядом і дослідженням одновимірних моделей з плоскими поверхнями. При цьому для врахування кривизни поверхні можна використовувати поправочний параметр, значення якого для різних геометричних форм наведено нижче. При використанні біоплівок з плоскими поверхнями необхідно звернути увагу на те, що в моделях біоплівки бере участь не вся товщина біоплівки, а лише її активна частина. Активна товщина біоплівки в умовах вилучення різних субстратів, наприклад, органічних забруднювачів і азоту, складається з різних бактерій, і тому процеси, які відбуваються в біоплівці, зокрема, її зростання, залежатимуть від конкуренції між ними, оскільки обидва типи бактерій використовують кисень для свого харчування.

Спочатку при формуванні гетерогенної структури біоплівки, яка складається з автотрофів, гетеротрофів та інертної біомаси, за відсутності обмеження кисню можуть розвиватися обидва типи бактерій. При цьому переважає швидкий ріст гетеротрофних мікроорганізмів по всій товщині біоплівки. Приблизно через 15 днів товщина біоплівки збільшується і по її товщинії починають домінувати повільно зростаючі автотрофні мікроорганізми, а гетеротрофні мікроорганізми повільно накопичуються біля її поверхні. Наближено через 19-20 днів відбувається відшарування (відмирання) мікроорганізмів, після чого залишається більше автотрофної біомаси. Слід зазначити, що відшарування зазвичай відбувається майже протягом усього часу утворення біоплівки, однак. протягом основного періоду швидкість відшарування буде нижчою, ніж швидкість утворення біомаси, і тому біоплівка росте. Більш детально утворення біоплівки розглянуто в роботах [2, 5, 9].

При сумісному очищенні стічних вод різних субстратів, зокрема органічного (ОС) і азоту (N), для забезпечення процесів їх вилучення гетеротрофними і автотрофними бактеріями, які знаходяться в різних шарах біоплівки, необхідний кисень. При цьому між зазначеними групами бактерій спостерігається значна конкуренція за кисень і тому процеси екстракції ОС і N, які відбуваються в різних шарах біоплівки, можуть бути обмежені нестачею кисню. У попередніх дослідженнях були визначені умови та критерії, за яких кисень буде обмежувати процес роздільного вилучення ОС та N у біоплівці через його визначену кількість проникнення в біоплівку [6, 10]. Швидкий ріст гетеротрофних бактерій призводить до незначного повільного росту автотрофних бактерій, а гетеротрофний ріст і екстракція органічної речовини обмежені автотрофним ростом, автотрофний ріст і окислення амонію пов'язані з нестачею кисню, який виноситься гетеротрофними бактеріями через шар, в якому він проходить, і тому гетеротрофи і автотрофи можуть існувати лише в тому випадку, коли концентрація органічної речовини (ХПК) в реакторі менше 30 мг/л. Тобто, при концентрації більше 30 мг/л нижче гетеротрофного шару не буде кисню для автотрофного шару. Таким чином, існування гетеротрофних і автотрофних бактерій можливе лише тоді, коли окислення органічної речовини обмежене значенням ХПК, а не киснем. Аналіз існуючих досліджень комбінованої очистки ОС і N показує, що аналогічні критичні значення було отримано також при аналізі роботи різних реакторів [4, 7, 10].

Крім того, встановлено, що на початку очищення стічних вод відбувається значне зростання біоплівки, яка потім інтенсивно зменшується, що також призводить до значних змін у перерозподілі біомаси. Формування товщини біоплівки з плином часу при великому і низькому співвідношенні ОС/N відбувається приблизно протягом 10 діб. При великому відношенні ОС/N зростання біоплівки відбувається в основному за рахунок видалення органічної речовини гетеротрофами, а видалення азоту (амонію) автотрофами майже відсутнє. При низьких співвідношеннях ОС/N відбувається значна нітрифікація разом із зростанням біоплівки, а видалення азоту починається майже після повного видалення ОС.

При зміні внутрішньої щільності змінюється і формування активності біоплівки. Її зростання істотно залежить від розподілу біомаси, тобто, від розташування в ній окремих компонентів.

Окрім того, на формування активної частини біоплівки впливають процеси утворення інертного осаду та позаклітинних полімерних речовин у складі біоплівки, які займають значний додатковий об'єм під час зростання біоплівки та в цілому впливають на її параметри.

На основі аналізу результатів теоретичних та експериментальних досліджень розроблено стратифіковану одновимірну модель структури біоплівки з домінуванням розміщення гетеротрофних бактерій на поверхні біоплівки та зростанням нітрифікаторів у глибині біоплівки по її товщині. При цьому, нижні шари біоплівки можуть бути використані для дослідження комбінованого вилучення ОС і N.

Для оцінки впливу стратифікації біоплівки також було проведено додаткове моделювання біоплівки з однорідним розподілом біомаси по її товщині. У випадку однорідної біоплівки відносна кількість гетеротрофів, автотрофів та інертної біомаси змінюється з часом в результаті загального росту. Таким чином, однорідний розподіл біомаси зменшує переваги гетеротрофів, які більше не домінують на поверхні біоплівки.

В процесі очистки стічних вод від розчинених забруднюючих речовин різного походження верхня поверхня біоплівки утворюється переважно криволінійної та різноманітної хвилеподібної форми [9].

Нижче приведено деякі рекомендації для врахування різних форм поверхні біоплівки, починаючи від плоскої поверхні до біоплівок типу «гриб» зі значними каналами та порами. Для цього на основі проведених досліджень пропонується використовувати безрозмірний коефіцієнт виду:

$$G = \frac{L_f^2 \mu_{\max} X_p}{DS_b}, \quad (9)$$

де X_p – концентрація бактерій у біоплівці, S_b – концентрація субстрату з обмеженою швидкістю росту в основній рідині, D – коефіцієнт дифузії, Lf – коефіцієнт дифузії в біоплівці, μmax – питома максимальна швидкість зростання мікроорганізмів в біоплівці (відомий параметр моделі).

У результаті проведеного аналізу було з'ясовано, що для біоплівок, які мають щільну тверду матрицю та плоску поверхню, можна прийняти за еталон параметр, що становитиме *Ae*=1. Тоді, коли ми розглядаємо складну структурну поверхню біоплівки типу «гриб» – різні скупчення і канали, то її слід враховувати при проведенні розрахунків шляхом введення параметра *G*, який буде більшим за одиницю. Зокрема, досліджене значення параметра *Ae* для 13 експериментальних структур поверхонь біоплівок у порівнянні з випадком абсолютно плоскої поверхні показало, що параметр *Ae* змінювався в межах *Ae* = 1,0-2,32 [5].

Таким чином, параметр *Ae* можна розглядати як міру неоднорідності біоплівки. Чим більше нерегулярна і геометрично неоднорідна її структура, тим більше значення *Ae* відхиляється від еталонного значення, отриманого для плоскої біоплівки (*Ae*=1).

Масоперенос у прикордонному шарі. У дослідженнях, проведених під час екстракції забруднюючих речовин біоплівками, сформованими в різних біореакторах, профілі концентрації в біоплівках розраховувалися за умови, що концентрація забруднюючих речовин на поверхні біоплівки вважалася рівною концентрації забруднюючих речовин в біореакторі *Le*. При цьому гідродинаміка потоку і концентрація *Le* в різних біореакторах була різною і це не враховувалась при розрахунках. Однак, навіть при повному перемішуванні в біореакторах спостерігається утворення прикордонного шару (рідкої плівки) і тому необхідно в моделях враховувати процес масопереносу забруднюючих речовин у біоплівку. У деяких роботах розглянуто процес утворення прикордонного шару та показано необхідність його врахування при надходженні потоку забруднюючих речовин в біоплівку через її поверхню. Для цього пропонується наступне рівняння у вигляді [2, 4]:

$$I_{L_F} = -D_F \cdot \frac{dL_F}{dz} \text{ at } z = 0, \quad (10)$$

яке враховує масообмін в прикордонному шарі, що відбувається за рахунок дифузії, DF. Для випадку екстракції забруднюючих речовин в аеротенку – змішувачі загальне рівняння матиме вигляд:

$$Q(L_0 - L_a) - I_{LF} A_F - r_b V_b = 0 \quad (11)$$

де, A_F – площа поверхні біоплівки, V_b – обсяг рідини в аеротенку, r_b – видалення забруднюючих речовин за рахунок плаваючого біоценозу, L0 – концентрація субстрату на виході, La – концентрація субстрату в рідині, що надходить [4]. Припускаючи. що

$$r_b V_b << I_{LF} A_F, \quad (12)$$

для визначення I_{LF} отримаємо

$$I_{LF} = \frac{QL_0}{A_F} - \frac{QL_a}{A_F} \quad (13)$$

Надалі рівняння (13) в моделях і розрахунках буде використовуватися в наступній формі:

$$I_{LF} = -D_F \frac{L_b - L_\delta}{\delta_p}, \quad (14)$$

де, δ_p – товщина прикордонного шару.

Для практичних розрахунків для визначення потоку можна використати наступне рівняння відносно I_{LF}:

$$I_{LF} = K_{\delta p}(L_b - L_\delta) = \frac{1}{R_{\delta p}}(L_b - L_\delta), \quad (15)$$

де, $K_{\delta p}$ – коефіцієнт передачі, $R_{\delta p}$ – зовнішній опір, який визначається як [4]:

$$K_{\delta p} = \frac{D_p}{\delta_p}, \quad K_{\delta p} = \frac{1}{R_{\delta p}}; \quad R_{\delta p} = \frac{\delta_p}{D_p}. \quad (16)$$

Як видно, параметри $K_{\delta p}$ і $R_{\delta p}$ залежать від товщини плівки рідини (прикордонного шару), δ_p ,та коефіцієнта дифузії в рідкій фазі D_p .

Таким чином, відповідно до (16) основна складність розрахунку $K_{\delta p}$ і $R_{\delta p}$ полягає у визначенні товщини прикордонного шару, оскільки значення параметра D_p для різних забруднюючих речовин по даним експериментальних робіт наведено, зокрема. в літературі [3, 4].

У деяких випадках форма елементів завантаження, на яких утворюється біоплівка, має сферичну форму, і опір можна визначити за допомогою відомих гідродинамічних безрозмірних критеріїв числа Шервуда:

$$Sh = \frac{d_L}{R_{\delta p} D_p}, \quad (17)$$

тут d_L – характерна довжина (наприклад, діаметр).

$$Sh = A + B\,\mathrm{Re}^m\, Sc^n \quad (18)$$

Зазначимо, що параметри *A*, *B*, *m* залежать від геометрії основи, що підтримує біоплівку, і, як правило, обґрунтовані лише в окремих випадках на основі використання експериментальних даних.

На основі рівняння (18) запропоновано наступну залежність для визначення коефіцієнта $K_{\delta p}$ в умовах сферичного навантаження:

$$K_{\delta p} = \frac{1,09}{\varepsilon} \mathrm{Re}^{1/3} S_c^{1/3} \frac{D_p}{d} \quad (19)$$

де, $S_c = \frac{\nu}{D}$ – Число Шмідта, $\mathrm{Re} = \frac{V d_L}{\nu}$ – Число Рейнольдса, ν – кінематична в'язкість, м2/с, d_L – діаметр біочастинки, ε – пористість.

На рис. 2, як приклад оцінки впливу δ_p, наведено графік $I_L = f\left(L_a, L_p\right)$ для різних випадків δ_p відповідно до кінетики Моно в аеротенку – змішувачі при $L = const$. Таким чином, при значній товщині прикордонного шару δ_p = 500 мкм потік ОЗ зменшується майже на 70%.

Тому для ефективності роботи біореактора товщина прикордонного шару повинна бути в межах 100-200 мкм.

Товщину прикордонного шару можна також визначити теоретично за відомою формулою [1, 5]:

$$L_{C_T} \approx \frac{d}{Sh}, \quad (20)$$

де, d – це діаметр труби.

Як зазначалося вище, на формування товщини біоплівки, а також товщини прикордонного шару впливає її неплоска вигнута поверхня і для визначення товщини прикордонного шару використовується наступне рівняння:

$$L_{C_P} = L_C \cdot \Omega \quad (21)$$

Для врахування впливу поверхневої структури біоплівки на масообмін у прикордонному шарі були прийняті наступні значення числа Шервуда в умовах ламінарних і турбулентних течій:

$$Sh_{лам.} = 8,7\,\mathrm{Re}_m^{0,5}\, Sc^{0,5} \left(\frac{d}{L}\right)^{0,5} \Omega^{-1}, \quad (22)$$

$$Sh_{турб.} = 0,16\,\mathrm{Re}_m^{0,75}\, Sc^{0,5} \Omega^{-1}, \quad (23)$$

Параметр Ω залежить від гідродинамічних і структурних умов під час росту біоплівки і може бути визначений наступним емпіричним співвідношенням [4,6]:

$$\Omega = e^{\left(6\mu^*\right)} \mathrm{Re}_\delta^{-\left(\mu^*/1,5\right)}, \quad \mathrm{Re}_\delta = \frac{Wd}{\nu} \quad (24)$$

Відносна швидкість росту μ^* визначається як відношення питомої швидкості росту μ_{LF} до максимальної швидкості росту $\mu_{\max}$ мікроорганізмів. Для гетеротрофних мікроорганізмів приймається μ_{max}= 5,5 добу$^{-1}$:

$$\mu^* = \frac{\mu_{LF}}{\mu_{\max}} \quad (25)$$

Цей коефіцієнт зростає зі збільшенням навантаження на підкладку біоплівки та числа *Re*. Найбільший ефект спостерігається при збільшенні навантаження при низькому *Re* (менше 2000). Товщина і структура поверхні біоплівки також залежить від навантаження і гідродинамічних умов. Біоплівка з однорідною гладкою поверхнею має місце при високому тангенціальному зсуві та низькому навантаженні. Таких біоплівок найбільша кількість і їх товщина зменшується зі збільшенням шорсткості поверхні біоплівки [8]. Крім того, в прикордонному шарі спостерігається не тільки дифузія, а й конвективний перенос субстрату. При цьому,

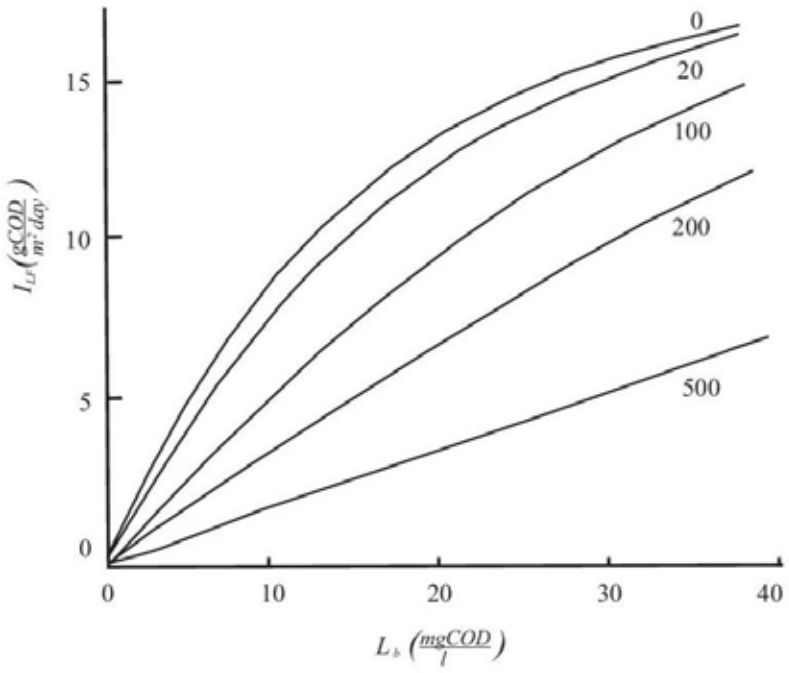


Рис. 2. Графік залежності потоку $I_{LF} = \int L_b \delta_p$ *за кінетикою Моно при* $\delta = 200$ *мкм*

масообмін через прикордонний шар біоплівки більший, ніж через поверхню без біоплівки.

Висновки. Проведені авторами наукові дослідження дозволяють зробити висновок, що для практичних розрахунків очищення стічних вод рекомендовано одновимірну модель однорідної біоплівки з урахуванням отриманих оцінок та обмежень на її використання. Порівняння результатів розрахунків з експериментальними даними засвідчило, що така однорідна модель у багатьох випадках добре узгоджується з експериментом. Запропоновано деякі рекомендації відносного визначення форми поверхні біоплівок.

Аналіз теоретичних досліджень засвідчив, що екстракція субстрату відбувається (в основному) у поверхневій частині біоплівки, що становить близько 20-25% від загальної товщини біоплівки δ.

Ефективність біологічних методів видалення забруднюючих речовин різного походження, зокрема органічних сполук (ОС) та азоту (N) у різних біореакторах можна підвищити за рахунок організації на поверхнях очисних споруд додаткового завантаження у вигляді фіксованого біоценозу з високою концентрацією мікроорганізмів (біоплівка). Однак, прийнята однорідна модель біоплівки з рівномірною товщиною потребує подальшого вдосконалення відносно формування її структури, зокрема, з урахуванням впливу різноманітних гідродинамічних факторів на функціонування біоплівки та наявності в ній інших неактивних речовин.

Література

1. Beyenal H., Tanyalac A.A. A mathematical model for hollow fiber biofim reactors. Chemical Engin.Science. 1994. № 56. С. 53-59.
2. Beyenal H., Levandowski Z. Modeling mass transport and microbial activity in stratified biofilms. Chemical Engin. Science. 2005. № 60. С. 4337-4348.
3. Lee M.W., Park J.M. One-dimensional mixed-culture biofilm considering different space occupancies of partical components. *Water Research*. 2007. № 4. С. 4317-4328.
4. Henze M., M., Van Loosdrecht M.E., Ekama G.A., Brdjanovic D. Biological Wastewater Treatment. London: IWA Publishing, 2008. С. 511.
5. Sehar S., Naz I. Role of the biofilms in wastewater treatment. *Intech Open*, chapter 7, 2016. С. 121-133.
6. Ellenter D., Milferstedt K., Zhang W., Hausner M. Influence of detachment on substrate removal and microbial ecology in heterotrophic/autotrophic biofilm. Nat. Res. 2007. № 41. С. 4657-4671.
7. Келарева Д.А., Кравчук А.М., Олійник О.Я. Моделювання сумісного видалення органічних забруднень та азоту при очищенні стічних вод методом біофільтрації. Доповіді Національної академії наук України. 2012. № 5. С. 179-183.
8. Moira Alvi Deep learning in wastewater treatment: a critical review. *Water Research*, vol.245. 2023. С. 1-15.
9. Levandowsky Z., Beynal H. Fundamental of biofilm research. *CRC Press*, 2014. 157 с.
10. Олійник О.Я., Телима С.В., Калугін Ю.І., Олійник Є.О. Теоретичний аналіз процесів очищення стічних вод від органічних забруднень сертифікованою біоплівкою. Доповіді Національної академії наук України. 2023. № 2. С. 55-64.

Дата першого надходження статті до видання: 02.09.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

ЗАГАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ

УДК 504.054:614.876
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.39

СТАН АГРОЛАНДШАФТІВ В УМОВАХ ВІЙСЬКОВОГО ЧАСУ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ ВІДНОВЛЕННЯ У ПІСЛЯВОЄННИЙ ПЕРІОД

Забарний О.С.[1], (orcid.org/0009-0007-3337-9386)
Броннікова Л.Ф.[2] (orcid.org/0000-0002-1790-161X)
[1]Інститут агроекології і природокористування Національної академії аграрних наук України
вул. Метрологічна, 12, 03143, м. Київ
[2]Вінницький національний аграрний університет,
вул. Сонячна, 3, 21008, м. Вінниця
oleksii_zabarnyi@ukr.net, linabronnikova@gmail.com

Повномасштабна збройна агресія РФ проти України спричинила масштабну трансформацію агроландшафтів, які є одним із базових компонентів продовольчої, екологічної та економічної безпеки держави. Вплив воєнних дій на сільськогосподарські території має комплексний характер і охоплює механічне руйнування ґрунтового покриву, ущільнення та перемішування ґрунтових горизонтів, утворення вирв, забруднення важкими металами, нафтопродуктами та залишками вибухових речовин, мінування земель, деградацію рослинного покриву, знищення полезахисних лісових насаджень, порушення гідрологічного режиму та скорочення площ сільськогосподарського використання. Додатковим чинником є синергія воєнного навантаження з посухами, тепловими хвилями, ерозійними процесами та іншими проявами кліматичних змін.

Проаналізовано праці українських і зарубіжних вчених, що опубліковані переважно у 2022–2026 рр., у яких досліджено ґрунтові, ландшафтні, водні, біологічні та продукційні наслідки війни. Показано, що відновлення агроландшафтів не може зводитися до розмінування та механічного повернення земель у сільськогосподарський обіг. Необхідним є поетапний процес, що включає екологічне обстеження, оцінювання ризиків, розмінування, локалізацію забруднення, відновлення ґрунтових властивостей, реконструкцію водогосподарської та протиерозійної інфраструктури, відновлення лісомеліоративних елементів і біорізноманіття та довгостроковий моніторинг.

Обґрунтовано доцільність переходу від концепції «відновлення довоєнного стану» до концепції екологічної реконструкції агроландшафтів, яка передбачає формування більш стійких, диверсифікованих і адаптивних агроекосистем. Особливе значення мають ґрунтозахисне землеробство, агроекологічна диверсифікація, відновлення лісосмуг, раціональне зрошення, збільшення вмісту органічного вуглецю, біоремедіація, цифрове картографування та використання супутникового моніторингу. *Ключові слова:* агроландшафт, ґрунт, деградація, забруднення, рекультивація, агроекологія, дистанційне зондування.

The state of agricultural landscapes under martial law and prospects for their restoration in the post-war period. Zabarnyi O., Bronnikova L.

The Russian Federation's full-scale armed aggression against Ukraine has led to a far-reaching transformation of agricultural landscapes, which are one of the fundamental components of the state's food, environmental and economic security. The impact of military operations on agricultural areas is multifaceted and encompasses the physical destruction of the soil cover, the compaction and mixing of soil horizons, the formation of craters, contamination with heavy metals, petroleum products and explosive residues, the mining of land, degradation of vegetation cover, the destruction of field-protecting forest stands, disruption of the hydrological regime and a reduction in areas under agricultural use. An additional factor is the synergy between the impact of military operations and droughts, heatwaves, erosion processes and other manifestations of climate change.

This study analyses works by Ukrainian and international researchers, published predominantly between 2022 and 2026, which investigate the soil, landscape, water, biological and productivity impacts of war. It is demonstrated that the restoration of agricultural landscapes cannot be reduced to demining and the mechanical return of land to agricultural use. A phased process is required, comprising environmental surveys, risk assessments, demining, pollution containment, restoration of soil properties, reconstruction of water management and anti-erosion infrastructure, restoration of forest-reclamation elements and biodiversity, and long-term monitoring.

The case has been made for moving away from the concept of 'restoring pre-war conditions' towards that of the ecological reconstruction of agricultural landscapes, which involves the creation of more sustainable, diversified and adaptive agroecosystems. Of particular importance are soil-conserving farming practices, agroecological diversification, the restoration of shelterbelts, rational irrigation, increasing organic carbon content, bioremediation, digital mapping and the use of satellite monitoring. *Key words:* agricultural landscape, soil, degradation, pollution, reclamation, agroecology, remote sensing.

© Забарний О.С., Броннікова Л.Ф., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. Агроландшафти України належать до стратегічно важливих природно-господарських систем. Особливе значення вони мають для України через високу частку сільськогосподарських земель та значне поширення чорноземів. Водночас висока інтенсивність землеробства, значна розораність території, дегуміфікація, ерозія, порушення структури ґрунту та спрощення ландшафтної мозаїчності формували передумови до зниження екологічної стійкості агроекосистем ще до 2022 р.

Повномасштабна війна стала додатковим потужним фактором дестабілізації. На відміну від традиційних видів антропогенного навантаження, військовий вплив характеризується високою інтенсивністю, просторовою фрагментарністю та виникненням одночасно кількох типів порушень. Ґрунтовий покрив зазнає механічного руйнування внаслідок вибухів, руху важкої техніки та будівництва фортифікацій, хімічного забруднення продуктами вибухів і горіння, а також біологічної деградації через втрату рослинного покриву та порушення ґрунтової біоти.

Актуальність дослідження. Сучасні дослідження вчених підтверджують, що воєнні дії призводять до комплексних змін властивостей ґрунтів. Досліджуючи територію України за допомогою польових спостережень і дистанційного зондування, виявлено збільшення частки дрібнодисперсного матеріалу та металів у місцях бомбардувань, а також істотні зміни рослинного покриву [1].

Важливе значення має й те, що наслідки війни не обмежуються безпосередньо зоною бойових дій. Порушення функціонування українського аграрного сектору впливає на міжнародні продовольчі ринки, структуру землекористування в інших країнах та глобальне біорізноманіття. Скорочення українського експорту внаслідок війни потенційно стимулює додаткове розширення площ ріллі в інших регіонах світу, що супроводжується ризиком втрати біорізноманіття [2].

Агроландшафт доцільно розглядати як складну природно-господарську систему, у межах якої сільськогосподарські угіддя взаємодіють із ґрунтами, водними ресурсами, природними біотопами, лісовою рослинністю, кліматичними факторами та системою господарського управління. У звичайних умовах стан агроландшафту оцінюють через показники родючості ґрунту, продуктивності культур, ерозійної небезпеки, водного режиму, біорізноманіття та структури землекористування. Проте військовий вплив потребує розширення цього підходу.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Авторський доробок спрямований на вирішення комплексу актуальних наукових і прикладних завдань, пов'язаних із оцінюванням сучасного екологічного стану агроландшафтів України в умовах воєнного впливу та визначенням перспектив їх екологічно безпечного відновлення у післявоєнний період.

В умовах масштабної трансформації земельних ресурсів унаслідок бойових дій, механічного порушення ґрунтового покриву, забруднення, деградації ґрунтів, пошкодження захисних насаджень і зміни структури землекористування особливого значення набуває формування науково обґрунтованих підходів до комплексної оцінки стійкості агроландшафтів. Це передбачає врахування сукупності ґрунтових, ландшафтно-екологічних, біологічних і просторових показників, здатних характеризувати рівень порушення природних функцій агроекосистем, їхню здатність до самовідновлення та потенціал повернення до екологічно безпечного й продуктивного стану.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасній літературі дедалі частіше використовується концепція «резильєнтності», яка характеризує не лише стан системи, а її здатність протистояти зовнішнім стресам, адаптуватися та відновлювати функціонування. Відомо, що поняття стійкості в аграрних системах охоплює кілька взаємодоповнювальних підходів – від стабільності та зниження вразливості до адаптивних можливостей і трансформації [3].

У контексті України це означає необхідність розмежування поточного екологічного стану, рівня деградації, вразливості, здатності до відновлення, адаптивності агроландшафту. Саме останні дві характеристики матимуть особливе значення у післявоєнний період.

Найбільш очевидним проявом військового впливу є механічна деградація ґрунтів. Вибухи боєприпасів формують вирви, переміщують значні об'єми ґрунтової маси, порушують генетичну структуру профілю та перемішують горизонти. Рух танків, бронетехніки та іншого важкого обладнання спричиняє ущільнення, зменшення пористості та погіршення водопроникності.

Комплексне дослідження вчених показало, що внаслідок бойових дій ґрунти зазнають одночасно фізичного, механічного та хімічного пошкодження. Особливо важливим є формування вторинних геоморфологічних процесів у вирвах [4].

Проведені дослідження ґрунтів Харківської області також засвідчили, що вирви після вибухів можуть ставати осередками вторинної трансформації рельєфу та накопичення важких металів [5].

Механічне пошкодження має довгострокове значення, оскільки воно впливає на водопроникність, аерацію, кореневмісний шар, агрегатну структуру, капілярність, ерозійну стійкість та здатність ґрунту накопичувати органічну речовину. Тому післявоєнна рекультивація не може обмежуватися вирівнюванням поверхні. Необхідно забезпечити відновлення функціональної структури ґрунтового профілю.

Одним із найбільш довготривалих наслідків війни є хімічне забруднення ґрунтів. Джерелами забруднення можуть бути уламки боєприпасів, продукти

вибуху, важкі метали, паливно-мастильні матеріали, продукти горіння військової техніки, промислові хімічні речовини, залишки вибухових речовин.

При проведенні дослідження ґрунтів пов'язаних із падінням авіабомб, артилерійськими ударами та згорілою військовою технікою було виявлено високий рівень забруднення територій важкими металами [6].

Група науковців, досліджуючи вміст хімічних елементів у ґрунтах на території, постраждалих від військових дій (Сумська, Харківська та Чернігівська обл.), продемонстрували необхідність оцінювання забруднення не лише за абсолютними концентраціями, а й з урахуванням екологічних ризиків [7, 8]. При цьому варто зважати на те, що токсичні елементи можуть переходити у доступні для рослин форми, мігрувати у ґрунтові води та потрапляти до харчових ланцюгів тварин та людей.

При дослідженні стану природоохоронних територій України, а саме а саме: Чорнобильського радіаційно-екологічного біосферного заповідника, Деснянсько-Старогутського національного природного парку, Голосіївського національного природного парку та Гетьманського національного природного парку, вченими встановлено руйнування ґрунтових горизонтів та забруднення ґрунтів унаслідок бойових дій, мінування та вибухів [9].

Детальне вивчення наслідків війни для флори і фауни України демонструє масштабний вплив мін, обстрілів, пожеж та забруднення на природні екосистеми. Виявлена необхідність залучення міжнародних організацій до вирішення екологічних проблем і притягнення винних до відповідальності [10].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Незважаючи на значну кількість сучасних досліджень, присвячених оцінюванню наслідків воєнних дій в Україні, питання комплексної оцінки трансформації та екологічної стійкості агроландшафтів залишається недостатньо опрацьованим. Більшість наявних наукових праць зосереджена на окремих компонентах воєнного впливу – фізичному порушенні ґрунтового покриву, забрудненні важкими металами та іншими токсикантами, утворенні вирв, пожежах, зміні землекористування або скороченні площ сільськогосподарського виробництва. Водночас комплексний характер трансформації агроландшафтів, за якого одночасно змінюються ґрунтові, біологічні, водні, ландшафтні та просторові компоненти, потребує системного наукового оцінювання. Вирішення цього завдання є необхідною передумовою для наукового обґрунтування диференційованої системи відновлення агроландшафтів України на засадах екологічної безпеки, сталого землекористування та збереження їхніх продуктивних і природоохоронних функцій.

Новизна. Систематизовано сучасні наукові підходи до комплексного оцінювання стану та екологічної стійкості агроландшафтів України, трансформованих унаслідок воєнних дій, з урахуванням фізичних, хімічних, біологічних і просторово-ландшафтних порушень. Удосконалено підхід до диференціації агроландшафтів за ступенем воєнного навантаження, рівнем екологічного ризику та потенціалом відновлення. Набули подальшого розвитку положення щодо інтеграції ґрунтового моніторингу, дистанційного зондування Землі та геоінформаційних технологій для оцінювання динаміки деградаційних процесів і контролю ефективності післявоєнного відновлення земель. Обґрунтовано необхідність переходу до диференційованої моделі екологічної реконструкції агроландшафтів, орієнтованої не лише на відновлення їх продуктивності, а й на відновлення екологічних функцій та довгострокової стійкості агроекосистем.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічне значення роботи полягає у формуванні системного підходу до оцінювання стану та екологічної стійкості агроландшафтів, які зазнали трансформації внаслідок воєнних дій. Запропонований підхід ґрунтується на комплексному врахуванні взаємопов'язаних фізичних, хімічних, біологічних, ландшафтних і просторових змін та передбачає розгляд агроландшафту як цілісної природно-антропогенної системи, здатність якої до функціонування та відновлення визначається сукупністю взаємопов'язаних компонентів.

Загальнонаукове значення дослідження полягає у систематизації сучасних теоретичних і методичних підходів до оцінювання воєнно зумовленої деградації земель, екологічної стійкості та потенціалу відновлення агроландшафтів. Обґрунтовано доцільність використання комплексу взаємодоповнювальних показників, що характеризують стан ґрунтового покриву, рівень забруднення, біологічну активність, стан рослинності, структуру землекористування та просторові зміни територій.

Виклад основного матеріалу. Особливого значення для агроландшафтів мають полезахисні лісосмуги. Вони зменшують швидкість вітру, захищають ґрунт від дефляції, зменшують випаровування, сприяють накопиченню снігу, створюють середовища для корисних організмів, формують екологічні коридори. Однак, встановлено, що війна спричинила пошкодження близько 18 % досліджених захисних насаджень у східному агролісомеліоративному регіоні України. Автори водночас наголошують на можливості та необхідності відновлення таких насаджень [11].

Одним із найбільш масштабних наслідків війни стала трансформація водогосподарської інфраструктури. Руйнування Каховської ГЕС та пов'язані з ним зміни водного режиму особливо сильно вплинули на агроландшафти півдня України.

Дослідники встановили, що до війни лише близько 1,6 % сільськогосподарських земель

України були зрошуваними, однак значна частина цих територій зазнала суттєвого скорочення продуктивності після початку вторгнення. Автори прогнозують посилення водного дефіциту в умовах кліматичних змін і обґрунтовують необхідність модернізації зрошення як компонента післявоєнної адаптації [12].

При огляді сталого управління ґрунтовими та водними ресурсами в Україні було наголошено на необхідності поєднання дистанційного моніторингу, польових обстежень і відновлення зрошувальних систем. Водночас критично важливими є методи та практики сталого управління водними ресурсами, ґрунтами та їхньою родючістю. Застосування таких підходів сприяє збереженню родючості ґрунтів, забезпечує надання необхідних екосистемних послуг та зміцнює загальну стійкість екосистем [13].

Війна призвела до значного скорочення площ фактично використовуваних сільськогосподарських земель. На основі супутникових даних та статистичних моделей встановлено, що приблизно 18,11 % посівних площ у досліджених східних областях залишалися незасіяними після початку війни. Втрати виробництва пшениці, соняшнику та ріпаку у 2022 р. порівняно з довоєнним періодом були оцінені приблизно у 36–37 % [14].

Однак поняття «незасіяні землі» не можна автоматично ототожнювати із «занедбаними землями». Науковці показали, що повне занедбання та тимчасове невикористання мають різні причини. У 2023 р. поля на територіях, які раніше отримували воду з Каховського водосховища, були приблизно утричі частіше незасіяними, ніж на інших територіях [15].

Нове дослідження 2025 р. дозволило розмежувати оброблювані, перелогові та занедбані землі. Автори встановили, що до 2024 р. близько 7 % українських орних земель були занедбаними, причому значна частина потенційно може бути втрачена для сільськогосподарського використання без спеціальних заходів відновлення [16].

В умовах війни традиційні польові методи мають суттєві обмеження через мінну небезпеку, окупацію та недоступність окремих територій. Тому особливого значення набувають системи супутникового спостереження.

Вченими запропоновано методику автоматичного виявлення пошкоджених сільськогосподарських полів на основі супутника Sentinel-2, спектральних каналів і вегетаційних індексів. У 2022 р. за допомогою запропонованої методики було ідентифіковано близько 500 тис. га пошкоджених сільськогосподарських угідь у десяти областях [17].

У 2025 р. було створено високодетальні карти землекористування України за 2016–2024 рр. із просторовим розрізненням 10 м. За їхніми результатами, площа ріллі скоротилася приблизно на 10 % у масштабах України, а в окупованих територіях зміни були ще значнішими [18].

Продуктивність є важливим, але не єдиним критерієм стану агроландшафту. Науковці встановили, що війна негативно вплинула на площі та врожайність озимих культур, причому дрібні господарства виявилися більш уразливими через нижчу здатність диверсифікувати ризики [19].

Сільськогосподарські втрати мають не лише локальний характер. Україна є одним із важливих постачальників зерна та олійних культур на світовий ринок, тому порушення українського виробництва впливає на глобальну продовольчу систему. Встановлено, що повна втрата обсягів сільськогосподарського виробництва в Україні має неоднорідний вплив на інші країни: прямі наслідки призводять до відносних втрат до 89 % соняшникової олії та 85 % кукурудзи, тоді як непрямі наслідки спричиняють втрати до 25 % м'яса птиці [20].

Ґрунт є центральним компонентом агроландшафту. Військові дії можуть впливати на вміст гумусу, органічний вуглець, pH, щільність, структурність, водопроникність, ємність катіонного обміну, вміст поживних елементів табіологічну активність грунту.

Сучасна концепція «soil health» передбачає комплексне оцінювання фізичних, хімічних і біологічних властивостей. У міжнародному дослідженні мінімального набору індикаторів для оцінювання здоров'я ґрунту запропоновано особливо важливі показники: органічний вуглець, мінералізацію вуглецю та агрегатну стабільність. Виявлено зв'язок показників «soil health» із продуктивністю культур у довготривалих польових дослідах [21, 22].

Для України це означає, що післявоєнна оцінка повинна визначати не лише ступінь забруднення, а й функціональну здатність ґрунту підтримувати рослинний покрив і врожайність.

Відновлення агроландшафтів необхідно розглядати як багатоступеневий процес. Аналізуючи міжнародний досвід післявоєнного відновлення, виникає необхідність врахування забруднення, ерозії, мінування, пошкодження ґрунтів і досвіду постконфліктних територій інших країн [23].

Систематизуючи сучасні дослідження, можна запропонувати таку послідовність етапів: Перший етап – первинне обстеження. Включає дистанційну оцінку, визначення меж пошкодження, аналіз історії землекористування та визначення потенційних джерел забруднення. Другий етап – розмінування. Передбачає безпечне очищення території є базовою передумовою будь-яких наступних заходів. Третій етап – екологічна діагностика, при якій визначаються фізичні властивості, хімічне забруднення, токсикологічні ризики, стан рослинності, водний режим. Четвертий етап – класифікація земель. Землі доцільно поділяти на придатні до негайного використання, придатні після локального відновлення, придатні після комплексної ремедіації, непридатні для сільського господарства у короткостроковій пер-

спективі, території, які доцільно перевести до природного відновлення.

Дослідження українських науковців вже формують практичну основу для відновлення постраждалих ґрунтів. Науковці вивчають меліоративні чинники відновлення ґрунтів після вибухового пошкодження та обґрунтовують використання поєднання органічних і мінеральних компонентів, біопрепаратів та інших агроекологічних заходів [24].

Вчені наголошують, що сучасне відновлення ґрунтів має бути спрямоване не лише на повернення окремих властивостей, а на відновлення мультифункціональності ґрунту – здатності одночасно забезпечувати продукційні, регулюючі та екосистемні функції [25].

Одним із головних довгострокових напрямів має бути збільшення запасів органічного вуглецю. Адже органічний вуглець покращує структуру ґрунту, збільшує водоутримувальну здатність, стимулює ґрунтову біоту, підвищує катіонний обмін, сприяє формуванню агрегатів, підвищує стійкість до посухи.

Одним із принципових напрямів післявоєнної трансформації повинна стати диверсифікація агроландшафтів. Надмірна концентрація на декількох культурах збільшує вразливість до кліматичних, економічних та біологічних ризиків.

До війни значна частина агроландшафтів України характеризувалася високою розораністю. Післявоєнний період створює можливість переглянути структуру землекористування. Частину деградованих або економічно малопридатних земель доцільно спрямувати на залуження, лісовідновлення, створення природних коридорів, відновлення водно-болотних угідь та формування буферних зон. Такий підхід дозволяє одночасно зменшити ерозію, підвищити біорізноманіття, накопичувати вуглець, регулювати водний режим та підвищити стійкість агроландшафту.

Для південних регіонів відновлення агроландшафтів без реконструкції систем зрошення буде неповним. Прогнозується, що кліматичні зміни до середини 21 століття можуть істотно посилити водний дефіцит, а розширення зрошення за умови раціонального використання поверхневих і підземних вод може стати важливим адаптаційним інструментом [12].

Післявоєнне відновлення агроландшафтів потребуватиме значних фінансових ресурсів. Вчені оцінили вартість відновлення лише пошкоджених сільськогосподарських земель Харківської області приблизно у 2 млрд доларів США. За екстраполяції на всю територію України автори отримали порядок величини близько 20 млрд доларів США. Автори підкреслюють, що припущення про автоматичне повернення сільськогосподарського виробництва до довоєнного рівня після завершення бойових дій є необґрунтованим [26].

Команда китайських науковців запропонували методику виявлення занедбаних сільськогосподарських земель України на основі багаторічних супутникових даних, що дозволяє відстежувати просторову динаміку занедбаності після початку війни [27]. Інша команда продемонструвала можливості MODIS (супутниковий сенсор, призначений для вимірювань параметрів Землі та клімату) для картографування занедбаних земель у зоні проведення бойових зіткнень [28].

Аналіз сучасної літератури дозволяє зробити принциповий висновок: стан агроландшафту не може характеризуватися одним показником. Наприклад, низька урожайність може бути наслідком війни, посухи, відсутності добрив або руйнування логістики. Висока урожайність, навпаки, не гарантує високої екологічної якості, якщо вона досягається ціною деградації ґрунту.

Головні висновки. Повномасштабна війна спричинила комплексну трансформацію агроландшафтів України, яка включає механічну деградацію ґрунтів, хімічне забруднення, мінування, порушення водного режиму, знищення рослинності, деградацію лісосмуг і скорочення площ сільськогосподарського використання.

Найбільш небезпечними для довгострокового функціонування агроландшафтів є поєднані фізичні та хімічні порушення ґрунту, оскільки вони здатні зберігатися після припинення бойових дій.

Значна частина пошкоджень має просторово неоднорідний характер, тому дистанційне зондування та ГІС є необхідними інструментами післявоєнного моніторингу.

Відновлення земель повинно здійснюватися диференційовано залежно від типу пошкодження, рівня забруднення, ступеня механічної деградації, мінної небезпеки та майбутнього функціонального призначення.

Особливе значення мають збільшення запасів органічного вуглецю, покривні культури, диверсифіковані сівозміни, органічні добрива, ґрунтозахисні технології та агролісомеліорація.

Для південних областей стратегічним напрямом має стати відновлення та модернізація системи зрошення з урахуванням майбутніх кліматичних змін.

Післявоєнне відновлення не повинно бути спрямоване лише на повернення агроландшафтів до довоєнного стану. Необхідно формувати нову, більш стійку та адаптивну структуру агроландшафтів.

Концептуально післявоєнне відновлення доцільно визначати як екологічну реконструкцію агроландшафтів, метою якої є не тільки відновлення продуктивності, а й підвищення стійкості, біорізноманіття, ґрунтового здоров'я, водорегулюючої здатності та адаптивності до кліматичних змін.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення системи моніторингу та

оцінювання стану трансформованих війною агроландшафтів України, їх просторової диференціації за рівнем порушення, екологічного ризику та потенціалом відновлення. Запропоновані підходи можуть бути інтегровані до геоінформаційних систем і технологій дистанційного зондування Землі для оперативного виявлення змін ґрунтового та рослинного покриву, землекористування й контролю динаміки відновлення територій. У післявоєнний період результати можуть бути використані для обґрунтування диференційованих заходів рекультивації, ремедіації, фіторемедіації та фітомеліорації земель, визначення пріоритетних територій для відновлення та оцінювання ефективності проведених заходів.

Література

1. Solokha M., Pereira P., Symochko L. et al. Russian-Ukrainian war impacts on the environment: Evidence from the field on soil properties and remote sensing. *Science of the Total Environment.* 2023. Vol. 902. Article 166122. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166122.
2. Chai L., Liu A., Li X. et al. Telecoupled impacts of the Russia–Ukraine war on global cropland expansion and biodiversity. *Nature Sustainability*. 2024. Vol. 7. P. 432–441. DOI: 10.1038/s41893-024-01292-z.
3. Van der Lee J., Kangogo D., Gülzari Ş. Ö. et al. Theoretical positions and approaches to resilience assessment in farming systems: A review. *Agronomy for Sustainable* Development. 2022. Vol. 42. Article 27. DOI: 10.1007/s13593-022-00755-x.
4. Mazur S., Demyanyuk O., Symochko L. et al. Soil degradation and contamination due to armed conflict in Ukraine. *Land.* 2024. Vol. 13, No. 10. Article 1614. DOI: 10.3390/land13101614.
5. Bonchkovskyi O., Ostapenko P., Bonchkovskyi A., Shvaiko V. War-induced soil disturbances in north-eastern Ukraine (Kharkiv region): Physical disturbances, soil contamination and land use change. *Science of the Total Environment*. 2025. Vol. 964. Article 178594. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.178594.
6. Krainiuk O. V., Buts Y. V., Ponomarenko R. V. et al. Environmental consequences of military operations in Ukraine on the example of soil research in the Kharkiv region. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2025. Vol. 34, No. 2. DOI: 10.15421/112526.
7. Datsko O., Melnyk O., Kovalenko I. et al. Estimation of the content of trace metals in Ukrainian military-affected soils. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 2025. Vol. 53, No. 1. Article 14328. DOI: 10.15835/nbha53114328.
8. Datsko O., Zakharchenko E., Butenko Y. et al. Ecological assessment of heavy metal content in Ukrainian soils. *Journal of Ecological Engineering*. 2024. Vol. 25, No. 11. P. 100–108. DOI: 10.12911/22998993/192669.
9. Filho W. L., Fedoruk M., Eustachio J. H. P. P. et al. The environment as the first victim: The impacts of the war on the preservation areas in Ukraine. *Journal of Environmental Management*. 2024. Vol. 364. Article 121399. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.121399.
10. Mammadov S., Luhovyi S., Starodubets O. et al. Collateral ecocide: The impact of war on Ukrainian flora and fauna. *International Journal of Environmental Studies*. 2024. Vol. 81, No. 1. P. 446–454. DOI: 10.1080/00207233.2024.2314851.
11. Matsala M., Odruzhenko A., Sydorenko S., Sydorenko S. War threatens 18 % of protective plantations in eastern agroforestry region of Ukraine. *Forest Ecology and Management.* 2025. Vol. 578. Article 122361. DOI: 10.1016/j.foreco.2024.122361.
12. Rosa L., Ragettli S., Sinha R. et al. Regional irrigation expansion can support climate-resilient crop production in post-invasion Ukraine. *Nature Food*. 2024. Vol. 5. P. 684–692. DOI: 10.1038/s43016-024-01017-7.
13. Vorotyntseva L., Panarin R., Kucher A. et al. Sustainable management of agricultural soil and water resources: current trends and challenges from global and Ukrainian perspectives. *Environmental Sciences Europe*. 2025. Vol. 37. Article 165. DOI: 10.1186/s12302-025-01220-8.
14. Chen B., Tu Y., An J. et al. Quantification of losses in agriculture production in eastern Ukraine due to the Russia-Ukraine war. *Communications Earth & Environment*. 2024. Vol. 5. Article 336. DOI: 10.1038/s43247-024-01488-3.
15. Hartman S., Whiteside R., Smaliychuk A., Dronova I. Land abandonment as an indicator of Ukrainian agricultural resilience during Russia's war against Ukraine. *Applied Geography*. 2025. Vol. 183. Article 103744. DOI: 10.1016/j.apgeog.2025.103744.
16. Wagner J., Nair S. S., Skakun S. et al. Monitoring cropland cultivation, abandonment, fallowing and recultivation dynamics with regard to conflict intensity in war-affected Ukraine. *Science of Remote Sensing*. 2025. Vol. 12. Article 100326. DOI: 10.1016/j.srs.2025.100326.
17. Kussul N., Drozd S., Yailymova H. et al. Assessing damage to agricultural fields from military actions in Ukraine. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.* 2023. Vol. 125. Article 103562. DOI: 10.1016/j.jag.2023.103562.
18. Kussul N., Shelestov A., Yailymov B. et al. Assessment of war-induced agricultural land use changes in Ukraine using machine learning applied to Sentinel satellite data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.* 2025. Vol. 140. Article 104551. DOI: 10.1016/j.jag.2025.104551.
19. Deininger K., Ali D. A., Kussul N. et al. Quantifying war-induced crop losses in Ukraine in near real time to strengthen local and global food security. *Food Policy*. 2023. Vol. 115. Article 102418. DOI: 10.1016/j.foodpol.2023.102418.
20. Laber M., Klimek P., Bruckner M. et al. Shock propagation from the Russia–Ukraine conflict on international multilayer food production network determines global food availability. *Nature Food*. 2023. Vol. 4. P. 508–517. DOI: 10.1038/s43016-023-00771-4.
21. Bagnall D. K., Rieke E. L., Cristine L. S. et al. A minimum suite of soil health indicators for North American agriculture. *Soil Security*. 2023. Vol. 10. Article 100084. DOI: 10.1016/j.soisec.2023.100084.
22. Willoughby C. M., Topp C. F. E., Hallett P. D. et al. Soil health metrics reflect yields in long-term cropping system experiments. *Agronomy for Sustainable Development*. 2023. Vol. 43. Article 65. DOI: 10.1007/s13593-023-00919-3.
23. Didenko N. O. Soil damage and recovery in Ukraine: Lessons from global post-war experiences. *Land Reclamation and Water Management.* 2024. No. 2. P. 79–86. DOI: 10.31073/mivg202402-391.
24. Корсун С. Г., Болоховська В. А., Болоховський В. В. Агроекологічне обґрунтування меліоративних чинників для відновлення ґрунтів, порушених воєнними діями. *Агроекологічний журнал.* 2024. №2. С. 100–112. DOI: 10.33730/2077-4893.2.2024.305663.

25. Neuenkamp L., García de León D., Hamer U. et al. Comprehensive tools for ecological restoration of soils foster sustainable use and resilience of agricultural land. *Communications Biology*. 2024. Vol. 7. Article 1577. DOI: 10.1038/s42003-024-07275-2.
26. Ostapenko P., Bonchkovskyi O., Semenikhin V. et al. From battlefields to blooming fields: The economic costs of restoring Ukraine's war-damaged agricultural soil. *Journal of Economic Issues*. 2025. Vol. 59, No. 4. P. 1129–1134. DOI: 10.1080/00213624.2025.2575153.
27. Zhang S., Zhang Y., Zhang X. et al. Revealing the distribution and change of abandoned cropland in Ukraine based on dual period change detection method. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Article 5765. DOI: 10.1038/s41598-025-89556-2.
28. Xu N., Zhuang H., Chen Y. et al. Mapping multi-crop cropland abandonment in conflict-affected Ukraine based on MODIS time series analysis. *Land.* 2025. Vol. 14, No. 8. Article 1548. DOI: 10.3390/land14081548.

Дата першого надходження статті до видання: 31.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

УДК 504.05:631.147:632.95
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.40

ЕКОЛОГІЧНА ТОКСИКОЛОГІЯ ЯК МЕТОДОЛОГІЧНА ОСНОВА ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ БІООРГАНІЧНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА НА ЕКОЛОГІЧНУ БЕЗПЕКУ АГРОЕКОСИСТЕМ ТА ЗНИЖЕННЯ АНТРОПОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ДОВКІЛЛЯ

Парахненко В.Г. (orcid.org/0000-0002-4312-6194),
Мандебура С.В. (orcid.org/0000-0001-7952-5974)
[1]Уманський національний університет
вул. Інститутська 1, 20300, Умань,
vladparachnenko@ukr.net, eko14b.mandebura@gmail.com

Здійснено комплексне дослідження екологічної токсикології як методологічної основи комплексного управління територією в умовах техноекології і змін, спрямованого на оцінювання впливу біоорганічного землеробства на екологічну безпеку агроекосистем та зниження антропогенного навантаження на довкілля. Актуальність дослідження зумовлена трансформацією аграрних територій під впливом інтенсивного землекористування, техногенного навантаження, кліматичних змін, деградації ґрунтового покриву, скорочення біологічного різноманіття та накопичення потенційно небезпечних речовин у компонентах агроекосистем. Особливої уваги потребує формування інтегрованих підходів до управління територіями, які поєднують принципи екологічної токсикології, техноекології, раціонального природокористування та адаптації аграрного виробництва до сучасних екологічних змін.

У роботі обґрунтовано методологічні засади застосування екологічної токсикології для комплексного оцінювання стану агроекосистем та ефективності біоорганічного землеробства в системі територіального управління. Розглянуто основні механізми надходження, міграції, трансформації та біоакумуляції токсикантів у ґрунтово-рослинних системах, а також їхній вплив на функціональну стабільність агроекосистем. Визначено роль біоорганічних технологій у зменшенні надходження синтетичних агрохімікатів, підтриманні природної родючості ґрунтів, активізації ґрунтової біоти та відновленні екосистемних функцій агроландшафтів. Запропоновано розглядати екологічну токсикологію як інструмент інтегрованого аналізу техногенних та аграрних впливів у межах комплексного управління територіями.

Особливу увагу приділено формуванню системи екологічного моніторингу територій із використанням токсикологічних, біоіндикаційних, агрохімічних та біоекологічних показників. Розглянуто можливість застосування показників токсичного навантаження, ферментативної активності ґрунтів, стану ґрунтових мікробіоценозів, рівнів біоакумуляції та інтегральних індексів екологічного ризику для оцінювання змін у функціонуванні агроекосистем. Обґрунтовано необхідність урахування техногенних факторів, змін землекористування та кліматичних трансформацій під час прийняття управлінських рішень щодо використання та відновлення аграрних територій.

Встановлено, що впровадження принципів біоорганічного землеробства у систему комплексного управління територіями сприяє зниженню антропогенного і хімічного навантаження, підвищенню екологічної стійкості агроекосистем, збереженню біологічного різноманіття та підтриманню функціональної стабільності ґрунтових екосистем. Застосування методології екологічної токсикології дає змогу своєчасно виявляти потенційні екологічні ризики, оцінювати наслідки техноекологічних змін та формувати науково обґрунтовані заходи з оптимізації територіального природокористування. Практичне значення результатів полягає у можливості їх використання під час розроблення регіональних програм екологічної безпеки, планування сталого землекористування, удосконалення агроекологічного моніторингу та формування системи адаптивного управління аграрними територіями в умовах сучасних екологічних змін. *Ключові слова:* екологічна токсикологія, комплексне управління територією, техноекологія, екологічні зміни, біоорганічне землеробство, агроекосистеми, екологічна безпека, антропогенне навантаження, екологічний ризик, біоіндикація, ґрунтова біота, агроекологічний моніторинг, сталий розвиток, раціональне природокористування.

Environmental toxicology as a methodological framework for assessing the impact of bio-organic farming on the ecological safety of agroecosystems and reducing anthropogenic pressure on the environment. Parakhnenko V., Mandebura S.

A comprehensive study of environmental toxicology was conducted as a methodological foundation for integrated land management in the context of techno-ecology and environmental change, aimed at assessing the impact of bio-organic farming on the environmental safety of agroecosystems and reducing anthropogenic pressure on the environment. The relevance of this study stems from the transformation of agricultural lands under the influence of intensive land use, technogenic pressure, climate change, soil degradation, a decline in biodiversity, and the accumulation of potentially hazardous substances in the components of agroecosystems. Particular attention should be paid to developing integrated approaches to land management that combine the principles of environmental toxicology, technoecology, sustainable natural resource use, and the adaptation of agricultural production to contemporary environmental changes.

© Парахненко В.Г., Мандебура С.В., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

This paper substantiates the methodological foundations for applying environmental toxicology to the comprehensive assessment of the state of agroecosystems and the effectiveness of bio-organic farming within the framework of territorial management. The paper examines the main mechanisms of the entry, migration, transformation, and bioaccumulation of toxicants in soil-plant systems, as well as their impact on the functional stability of agroecosystems. The role of bio-organic technologies in reducing the input of synthetic agrochemicals, maintaining natural soil fertility, stimulating soil biota, and restoring the ecosystem functions of agricultural landscapes is identified. It is proposed to consider environmental toxicology as a tool for the integrated analysis of anthropogenic and agricultural impacts within the framework of comprehensive land management.

Particular attention is paid to the development of a system for environmental monitoring of territories using toxicological, bioindicator, agrochemical, and bioecological indicators. The possibility of using indicators of toxic load, soil enzymatic activity, the state of soil microbiocenoses, bioaccumulation levels, and integrated ecological risk indices to assess changes in the functioning of agroecosystems is considered. The paper justifies the need to account for anthropogenic factors, changes in land use, and climate change when making management decisions regarding the use and restoration of agricultural lands.

It has been established that the integration of the principles of bio-organic agriculture into a comprehensive land management system helps reduce anthropogenic and chemical pressures, enhance the ecological resilience of agroecosystems, preserve biodiversity, and maintain the functional stability of soil ecosystems. The application of environmental toxicology methodology makes it possible to identify potential environmental risks in a timely manner, assess the consequences of technogenic and environmental changes, and develop scientifically sound measures to optimize land use. The practical significance of these results lies in their applicability to the development of regional environmental safety programs, the planning of sustainable land use, the improvement of agroecological monitoring, and the establishment of a system for adaptive management of agricultural territories in the context of contemporary environmental changes. *Key words:* environmental toxicology, integrated land management, environmental engineering, environmental changes, bio-organic farming, agroecosystems, environmental safety, anthropogenic pressure, environmental risk, bioindication, soil biota, agroecological monitoring, sustainable development, rational use of natural resources.

Постановка проблеми. У сучасних умовах трансформації природних та антропогенно змінених територій питання забезпечення екологічної безпеки, раціонального природокористування та ефективного управління територіальними системами набуває особливої актуальності. Інтенсифікація сільськогосподарського виробництва, зростання техногенного навантаження, деградація ґрунтових ресурсів, скорочення біологічного різноманіття, зміни структури землекористування та кліматичні трансформації формують складний комплекс техноекологічних ризиків. Особливого значення за таких умов набуває комплексне управління територією, яке передбачає інтегроване врахування стану природних ресурсів, характеру антропогенного впливу, екологічних змін та здатності екосистем до самовідновлення. Важливою складовою такого підходу є застосування принципів екологічної токсикології для оцінювання накопичення, міграції та трансформації токсичних речовин у компонентах агроекосистем.

Впровадження біоорганічного землеробства розглядається як один із перспективних напрямів зменшення антропогенного навантаження на аграрні території та підвищення їх екологічної стійкості. Застосування органічних добрив, біологічних засобів захисту рослин, сівозмін, покривних культур та інших екологічно орієнтованих агротехнологій сприяє відновленню природних ґрунтових процесів, підтриманню біологічного різноманіття та зниженню ризику надходження небезпечних речовин у природні компоненти. Водночас оцінювання екологічної ефективності таких систем потребує врахування не лише агрохімічних показників, а й токсикологічних характеристик, біоакумуляції забруднювачів, стану ґрунтової біоти та змін функціональних властивостей агроекосистем.

Актуальність дослідження. Упродовж останніх років у науковій літературі спостерігається посилення уваги до проблем комплексного управління територіями, забезпечення екологічної безпеки, раціонального природокористування та адаптації територіальних систем до сучасних техноекологічних змін. Значний внесок у розвиток теоретичних засад екологічної безпеки, управління природними ресурсами та сталого розвитку територій зробили дослідження, присвячені оцінюванню антропогенного навантаження, трансформації природних комплексів, функціонуванню екосистем та оптимізації структури землекористування. У сучасних працях обґрунтовується необхідність переходу від галузевого управління окремими природними ресурсами до інтегрованого територіального підходу, який враховує взаємозв'язки між природними, соціально-економічними та техногенними процесами.

Паралельно у сучасній науковій думці посилюється увага до необхідності врахування природних і антропогенних змін у системах територіального управління. Кліматичні зміни, трансформація землекористування, техногенне навантаження, урбанізаційні процеси та деградація природних ресурсів зумовлюють необхідність розроблення інтегрованих систем моніторингу та оцінювання екологічного стану територій. У низці досліджень обґрунтовується доцільність поєднання екологічного моніторингу, геоінформаційних технологій, біоіндикаційних методів, токсикологічного аналізу та просторового моделювання для формування комплексної інформаційної основи прийняття управлінських рішень [4].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Попри значний розвиток досліджень у сфері територіального управління, техноекології, екологічної токсикології та сталого землекористування, зали-

шається низка аспектів, що потребують подальшого теоретичного та методологічного обґрунтування. Насамперед недостатньо сформованою є інтегрована концепція комплексного управління територією в умовах техноекології і змін, яка б одночасно враховувала рівень антропогенного та техногенного навантаження, стан природних ресурсів, екологічні ризики, динаміку землекористування та здатність екосистем до самовідновлення.

У наявних дослідженнях часто переважає фрагментарний підхід до оцінювання територіальних систем, що проявляється у роздільному аналізі ґрунтових, водних, біологічних або техногенних компонентів без достатньої інтеграції отриманих результатів у єдину систему територіального управління. Це ускладнює об'єктивне визначення просторової диференціації екологічних ризиків, встановлення взаємозв'язків між джерелами антропогенного впливу та змінами стану екосистем, а також прогнозування довгострокових наслідків техноекологічної трансформації територій.

Окремою невирішеною проблемою залишається недостатня інтеграція екологічної токсикології у систему комплексного управління територіями. Існуючі підходи переважно орієнтовані на визначення концентрацій окремих забруднювачів і не завжди враховують їх біологічну доступність, кумулятивний вплив, біоакумуляцію та трансформацію у компонентах екосистем. Недостатньо розробленими залишаються також комплексні показники, які дозволяли б поєднати токсикологічні характеристики із просторовими параметрами антропогенного навантаження та функціональною стійкістю територіальних екосистем [5].

Новизна: дослідження полягає у формуванні інтегрованого підходу до комплексного управління територією в умовах техноекології і змін, що базується на положеннях екологічної токсикології, принципах системної екології, раціонального природокористування та врахуванні особливостей функціонування природних і антропогенно трансформованих територіальних систем. Вперше запропоновано розгляд екологічної токсикології не лише як інструменту визначення рівня забруднення природних компонентів, а як методологічної основи комплексного оцінювання екологічних ризиків, техногенних впливів та динаміки екологічних змін у системі територіального управління.

На відміну від існуючих підходів, у роботі акцентовано увагу на інтеграції показників антропогенного і техногенного навантаження, рівня забруднення природних компонентів, міграції та трансформації потенційно небезпечних речовин, біоакумуляції токсикантів, стану біологічного різноманіття та функціональної стійкості екосистем. Це дозволяє розглядати територію як цілісну динамічну систему, у межах якої взаємодіють природні, техногенні, соціально-економічні та агроекологічні процеси, що визначають її сучасний екологічний стан і напрями подальших змін.

Методологічне або загальнонаукове значення полягає у формуванні цілісного інтегрованого підходу до комплексного управління територією в умовах техноекології і змін, який базується на поєднанні положень екологічної токсикології, принципів системної екології, раціонального природокористування та сучасних уявлень про функціонування природних і антропогенно трансформованих територіальних систем. Запропонована методологічна основа передбачає комплексне врахування результатів екологічного моніторингу, токсикологічного аналізу, біоіндикаційних оцінок, показників антропогенного і техногенного навантаження, стану природних ресурсів та функціональної стійкості екосистем. Це дає змогу сформувати цілісне уявлення про сучасний екологічний стан територій, визначити основні джерела негативного впливу та оцінити рівень екологічних ризиків.

У межах запропонованого підходу акцент зроблено на інтеграції токсикологічних, біологічних, екологічних та просторових показників для оцінювання характеру техноекологічних змін і визначення їх впливу на функціонування територіальних систем. Передбачається врахування процесів міграції, трансформації та накопичення потенційно небезпечних речовин у компонентах довкілля, просторової диференціації антропогенного навантаження, стану біологічного різноманіття та здатності екосистем до саморегуляції й самовідновлення. Така методологічна основа дозволяє перейти від роздільного аналізу окремих компонентів довкілля до комплексного оцінювання території як єдиної взаємопов'язаної природно-антропогенної системи.

Важливою складовою запропонованого підходу є врахування ролі біоорганічного землеробства у формуванні екологічно збалансованої структури землекористування. Біоорганічні технології розглядаються як один із практичних механізмів зниження хімічного та антропогенного навантаження, відновлення функціональних властивостей ґрунтів, підтримання ґрунтової біоти та підвищення стійкості агроекосистем. Їх оцінювання в межах системи комплексного управління територією дозволяє встановити взаємозв'язок між характером землекористування, рівнем токсикологічного навантаження та загальним екологічним станом територіальних систем.

Виклад основного матеріалу. Дослідження зосереджене на формуванні методологічних засад комплексного управління територією в контексті техноекології і сучасних екологічних змін, з особливим акцентом на використанні положень екологічної токсикології для оцінювання стану природних та антропогенно трансформованих територіальних систем. Основна увага приділяється визначенню рівня антропогенного і техногенного навантаження

на компоненти довкілля, оцінюванню характеру міграції, трансформації та накопичення потенційно небезпечних речовин у ґрунтах, воді та рослинному покриві, а також визначенню змін функціонального стану екосистем під впливом сучасних форм господарської діяльності.

Комплексне управління територією передбачає системне врахування взаємозв'язків між природними ресурсами, характером землекористування, рівнем техногенного навантаження, станом екосистем та соціально-економічними чинниками розвитку територій. У цьому контексті екологічна токсикологія розглядається як важливий методологічний інструмент, що дозволяє оцінити не лише концентрації окремих забруднювальних речовин, а й потенційні екологічні наслідки їхньої присутності, акумуляції та біологічної дії. Такий підхід створює можливість перейти від фрагментарного аналізу окремих компонентів довкілля до комплексної оцінки екологічної безпеки території.

Екологічна токсикологія у запропонованій системі комплексного управління територією дає змогу простежити взаємозв'язок між джерелами забруднення, шляхами поширення токсичних речовин та їхнім впливом на біотичні компоненти екосистем. Особлива увага приділяється процесам міграції забруднювальних речовин між ґрунтом, водою, рослинами та живими організмами. Такий підхід дозволяє визначати потенційні зони екологічного ризику, встановлювати території з підвищеним рівнем токсикологічного навантаження та обґрунтовувати необхідність упровадження відповідних природоохоронних заходів.

Важливим напрямом дослідження є оцінювання впливу біоорганічного землеробства на стан територіальних екосистем. Біоорганічні технології розглядаються не лише як спосіб ведення сільськогосподарського виробництва, а як складова комплексного управління земельними ресурсами та механізм зниження антропогенного навантаження на довкілля. Обмеження використання синтетичних пестицидів і надмірних доз мінеральних добрив, застосування органічних речовин для відновлення родючості ґрунтів, підтримання біологічної активності та стимулювання природних процесів ґрунтоутворення сприяють зменшенню токсикологічних ризиків і підвищенню екологічної стійкості агроекосистем.

Для комплексного оцінювання території доцільним є поєднання токсикологічних, біологічних, агрохімічних та просторових показників. Використання методів екологічного моніторингу, біоіндикації, лабораторного аналізу, геоінформаційного картографування та просторового моделювання дозволяє визначати територіальні закономірності розподілу антропогенного навантаження. Інтеграція таких даних забезпечує можливість виділення територій із різним рівнем екологічного ризику та обґрунтування пріоритетних напрямів природоохоронного управління.

Особливе значення в умовах сучасних екологічних змін має просторовий аспект управління. Території не є однорідними за рівнем антропогенного навантаження, природною стійкістю та здатністю до самовідновлення. Тому управлінські рішення мають базуватися на диференційованій оцінці окремих функціональних зон. Території з високим рівнем токсикологічного навантаження потребують посиленого моніторингу та обмеження найбільш небезпечних видів господарської діяльності, тоді як території з відносно стабільним екологічним станом можуть виконувати функції природних буферів і осередків відновлення біологічного різноманіття.

У межах комплексного управління територією важливим є формування системи екологічних індикаторів, які дозволяють оцінювати зміни у часі. До таких індикаторів можуть належати концентрації забруднювальних речовин, рівень токсикологічного навантаження, показники біологічної активності ґрунтів, стан рослинного покриву, рівень біорізноманіття, якість поверхневих і підземних вод, ступінь деградації земель та інтенсивність господарського використання території. Їх комплексне застосування дає змогу оцінити не лише поточний стан території, а й напрям та швидкість екологічних змін.

Застосування такого підходу дозволяє перейти від реагування на вже сформовані екологічні проблеми до їх прогнозування та попередження. Екологічна токсикологія в цьому випадку виконує не лише діагностичну функцію, а й забезпечує наукове обґрунтування управлінських рішень щодо зниження екологічних ризиків. Виявлення джерел токсикологічного навантаження, визначення шляхів міграції забруднювальних речовин та оцінювання їхнього впливу на живі організми створюють основу для розроблення превентивних природоохоронних заходів.

Таким чином, комплексне управління територією в контексті техноекології і змін має ґрунтуватися на системному поєднанні екологічного моніторингу, екологічної токсикології, біоіндикації, просторового аналізу та принципів раціонального природокористування. Біоорганічне землеробство в такій системі виступає одним із важливих інструментів зниження антропогенного навантаження, відновлення функціональних властивостей ґрунтів і підвищення екологічної безпеки агроекосистем.

Узагальнення отриманих положень свідчить, що інтеграція екологічної токсикології в систему комплексного управління територіями дозволяє більш обґрунтовано оцінювати наслідки техногенних та аграрних впливів, визначати територіальні зони екологічного ризику та розробляти адаптивні управлінські рішення. Такий підхід спрямований на забезпечення екологічної безпеки, збереження природно-ресурсного потенціалу територій, зниження антропогенного навантаження та формування передумов для сталого розвитку територіальних систем.

Головні висновки. У ході дослідження обґрунтовано методологічне значення екологічної токсикології як важливої складової комплексного управління територією в контексті техноекології і сучасних екологічних змін. Показано, що поєднання токсикологічних підходів із принципами системної екології, раціонального природокористування та просторового аналізу дозволяє комплексно оцінювати стан природних і антропогенно трансформованих територій, визначати рівень техногенного та антропогенного навантаження, а також встановлювати основні фактори формування екологічних ризиків.

Встановлено, що комплексне управління територією має ґрунтуватися на врахуванні взаємозв'язків між характером землекористування, станом ґрунтового та рослинного покриву, якістю водних ресурсів, рівнем забруднення, біологічним різноманіттям та здатністю екосистем до саморегуляції і самовідновлення. Застосування екологічної токсикології забезпечує можливість оцінювання процесів міграції, трансформації та накопичення потенційно небезпечних речовин у компонентах довкілля, що дозволяє своєчасно визначати території з підвищеним рівнем екологічного ризику.

Обґрунтовано, що біоорганічне землеробство може розглядатися як один із практичних інструментів комплексного управління територіями та зниження антропогенного навантаження на довкілля. Застосування біоорганічних технологій сприяє зменшенню хімічного навантаження на ґрунтовий покрив, підтриманню біологічної активності ґрунтів, збереженню ґрунтової біоти, підвищенню природної стійкості агроекосистем та формуванню більш екологічно збалансованої структури землекористування.

Проведений аналіз засвідчив доцільність інтеграції токсикологічних, біоіндикаційних, агроекологічних та просторових методів для оцінювання техноекологічних змін на територіальному рівні. Комплексне використання показників забруднення, стану природних ресурсів, біологічної активності ґрунтів, рівня антропогенного навантаження та екологічної стійкості дозволяє перейти від оцінювання окремих компонентів довкілля до цілісної характеристики території як взаємопов'язаної природно-антропогенної системи.

Результати дослідження мають практичне значення для вдосконалення систем екологічного моніторингу, територіального планування та управління природними ресурсами в умовах техноекологічних змін. Запропонований методологічний підхід може бути використаний для визначення зон підвищеного екологічного ризику, обґрунтування природоохоронних заходів, оптимізації структури землекористування та впровадження екологічно орієнтованих технологій господарювання. Його застосування сприятиме зниженню антропогенного і техногенного навантаження, підвищенню екологічної безпеки територій та формуванню передумов для їх сталого розвитку.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення системи комплексного управління територіями в умовах сучасних техноекологічних змін та зростання антропогенного навантаження на природні ресурси. Запропонований екологічно-токсикологічний підхід дозволяє підвищити обґрунтованість оцінювання екологічного стану територіальних систем, своєчасно виявляти зони підвищеного токсикологічного та техногенного навантаження, визначати основні джерела екологічних ризиків і прогнозувати можливі довгострокові наслідки господарської діяльності [8].

Практичне застосування отриманих результатів можливе у діяльності органів державного та місцевого управління, установ екологічного контролю, науково-дослідних організацій, територіальних громад, аграрних підприємств та інших суб'єктів природокористування. Використання інтегрованих токсикологічних, біоіндикаційних, агроекологічних і просторових показників може сприяти вдосконаленню систем екологічного моніторингу, територіального планування, оцінювання екологічних ризиків та обґрунтування управлінських рішень щодо раціонального використання природних ресурсів.

Перспективним напрямом є застосування запропонованого підходу для просторового диференціювання територій за рівнем антропогенного і техногенного навантаження. Це дозволить визначати території з різним ступенем екологічної небезпеки, встановлювати пріоритетність природоохоронних заходів, оптимізувати структуру землекористування та формувати адаптивні моделі управління природними ресурсами з урахуванням здатності окремих екосистем до саморегуляції та самовідновлення.

Важливі перспективи пов'язані з використанням результатів для розвитку екологічно орієнтованого землекористування. Зокрема, впровадження біоорганічних технологій може розглядатися як один із практичних механізмів зниження хімічного навантаження на ґрунтовий покрив, підтримання біологічної активності ґрунтів, збереження біорізноманіття та підвищення стійкості агроекосистем. Інтеграція таких технологій у систему комплексного управління територіями створює можливості для формування більш збалансованої структури землекористування та зменшення негативного впливу сільськогосподарської діяльності на довкілля.

У подальшому результати дослідження можуть бути використані для розроблення інтегральних індикаторів екологічної безпеки територій, геоінформаційних моделей оцінювання техноекологічних змін та систем прогнозування екологічних ризиків.

Впровадження результатів дослідження сприятиме переходу від фрагментарного реагування на

окремі екологічні проблеми до системного управління територіями з урахуванням взаємодії природних, техногенних та соціально-економічних чинників. У перспективі це створює науково-методичне підґрунтя для формування адаптивної моделі комплексного управління територіями, спрямованої на зниження антропогенного навантаження, підвищення екологічної безпеки, збереження природно-ресурсного потенціалу та забезпечення сталого розвитку територіальних систем.

Література

1. Голембіовська О. І., Гребенюк Т. В., Федченко Є. П. Екотоксикологічна оцінка ґрунтів методом біотестування (Danio rerio). Екологічні науки. № 1(64). 2026. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.1-64.12
2. Дем'янюк О. С., Симочко Л. Ю., Шацьман Д. К. Структура та динаміка мікробних угруповань ґрунтів трансформованих екосистем. Environmental Research, Engineering and Management, 2020. DOI: https://doi.org/10.5755/j01.erem.76.4.23508
3. Коляда О. В., Коробкова Г. В., Латуша Д. Р. Аналіз та моделювання фітотоксичності чорноземного ґрунту, забрудненого нафтопродуктами. Український журнал природничих наук**,** 2025. DOI: https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.37
4. Крайнюков О. М., Кривицька І. А., Найдьонова О. Є. Еколого-токсикологічна оцінка якості ґрунтів території Харківського району Харківської області. Український журнал природничих наук, 2024. DOI: https://doi.org/10.32782/naturaljournal.7.2024.3
5. Лялько В. І., Жолобак Г. М., Ходоровський А. Я. Космічний моніторинг довкілля як інструмент екологічної безпеки. Ukrainian Journal of Remote Sensing, 2019. DOI: https://doi.org/10.36023/ujrs.2019.20.145
6. Онищук І. П., Кичкирук О. Ю., Гаврилова А. М. Визначення вмісту іонів важких металів у ґрунтах, трансформованих у результаті вибухів. Український журнал природничих наук. 2025. DOI: https://doi.org/10.32782/naturaljournal.13.2025.36
7. Палапа Н. В., Гончар С. М. Екологічні ризики, пов'язані із сільськогосподарською діяльністю людини. Агроекологічний журнал, 2022. DOI: https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2022.255189
8. Parakhnenko, V., Shemiakin, M., Vasylenko, O., Borovyk, P., & Honcharuk, V. (2026). Innovative ecological approaches to protecting natural and agroecosystems from the negative impact of invasive species. Journal Environmental Problems, 11(2), 158-168. https://doi.org/10.23939/ep2026.02.158

Дата першого надходження статті до видання: 04.09.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

ЗБЕРЕЖЕННЯ БІОЛОГІЧНОГО ТА ЛАНДШАФТНОГО РІЗНОМАНІТТЯ

УДК 582.594:581.5
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.41

СТАН ПОПУЛЯЦІЙ РОСЛИН РОДИНИ ORCHIDACEAE НА ТЕРИТОРІЇ НАЦІОНАЛЬНОГО ПРИРОДНОГО ПАРКУ «ДЕРМАНСЬКО-ОСТРОЗЬКИЙ»

Головко О.В.[1, 2] (orcid.org/0009-0001-0716-7204),
Лелюх Р.Ю.[1] (orcid.org/0009-0004-7296-4121),
Кальчук Г.В.[2] (orcid.org/0009-0005-8396-815X)
[1]Національний університет водного господарства та природокористування
вул. Соборна, 11, 33000, м. Рівне
[2]Національний природний парк «Дермансько-Острозький»
пр. Незалежності, 9, 35800, м. Острiг
o.v.holovko@nuwm.edu.ua, r.y.leliukh@nuwm.edu.ua, nppostrog@ukr.net

У статті узагальнено результати дослідження стану популяцій представників родини Orchidaceae на території Національного природного парку «Дермансько-Острозький». Проаналізовано чисельність, щільність, онтогенетичну структуру, відновлювальну та генеративну здатність популяцій і морфометричні характеристики генеративних рослин. Встановлено неоднорідність стану орхідних, пов'язану з типом біотопу та стабільністю умов середовища.

Лісові популяції за повторними спостереженнями загалом виявляють більшу стабільність. *Platanthera chlorantha* характеризується збереженням чисельності та стабільними морфометричними показниками, що свідчить про добрий стан локальної популяції. У *Neottia nidus-avis* відзначено збільшення кількості квіток у генеративних пагонах і зменшення варіабельності морфометричних ознак. *Goodyera repens* має мозаїчну просторову структуру, тому відсутність рослин під час обліку не є достатньою підставою для висновку про зникнення локалітету.

Лучні та болотні види виявилися більш залежними від умов зволоження. *Epipactis palustris* має значний потенціал відновлення, хоча частка генеративних рослин є невисокою. *Dactylorhiza incarnata* характеризується задовільним станом і доброю відновлювальною здатністю. Для *Gymnadenia conopsea* встановлено міжрічні коливання генеративної частини популяції, які можуть бути пов'язані з погодними та гідрологічними умовами й не обов'язково свідчать про погіршення стану. Результати підтверджують необхідність оцінювати популяції за сукупністю показників і в динаміці. Обґрунтовано довгостроковий моніторинг за уніфікованим протоколом із одночасною оцінкою стану біотопів. Для болотних і заплавних популяцій важливим є контроль гідрологічного режиму, оскільки зміна зволоження може впливати на життєвий цикл рослин. Такий підхід дає змогу точніше визначати тенденції змін і не ототожнювати короткочасні коливання чисельності чи генеративної активності з погіршенням стану популяцій. Повторні обстеження у відповідні фенологічні періоди підвищують достовірність оцінювання та дають змогу виявляти стійкі зміни. *Ключові слова:* Orchidaceae, рідкісні види, ценопопуляція, онтогенетична структура, чисельність, щільність, моніторинг, НПП «Дермансько-Острозький».

Population status of Orchidaceae plant species in the territory of the National Nature Park «Dermansko-Ostrozhskyi». Holovko O., Leliukh R., Kalchuk G.

The paper summarizes the results of studies on the condition of orchid populations (Orchidaceae) within the National Nature Park «Dermansko-Ostrozhskyi». Abundance, density, ontogenetic structure, regeneration and generative capacity, and morphometric traits of generative plants were analyzed. The condition of orchid populations was heterogeneous and related mainly to habitat type and environmental stability.

Forest populations generally showed greater stability during repeated observations. *Platanthera chlorantha* was characterized by stable abundance and morphometric parameters, indicating good condition of the local population. In *Neottia nidus-avis*, repeated observations revealed an increase in the number of flowers on generative shoots and reduced variability of morphometric traits. *Goodyera repens* showed a mosaic spatial structure; therefore, the absence of plants during one survey was not sufficient evidence of locality disappearance.

Meadow and wetland species were more dependent on moisture conditions. *Epipactis palustris* had considerable regeneration potential, although the proportion of generative plants was relatively low. *Dactylorhiza incarnata* was characterized by satisfactory condition and good regenerative capacity. *Gymnadenia conopsea* showed interannual fluctuations in its generative component, which may be associated with weather and hydrological conditions and do not necessarily indicate deterioration. The findings confirm the need to assess populations using a combination of indicators and repeated observations. Long-term monitoring based on a standardized

© Головко О.В., Лелюх Р.Ю., Кальчук Г.В., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

protocol, together with assessment of habitat condition, is therefore necessary. For wetland and floodplain populations, particular attention should be given to the hydrological regime, since changes in moisture may affect all stages of the plant life cycle. Repeated surveys conducted at appropriate phenological periods improve the reliability of population assessment and help distinguish short-term fluctuations in abundance or generative activity from persistent changes in condition. This approach is important for identifying trends and planning conservation measures. *Key words:* Orchidaceae, rare species, cenopopulation, ontogenetic structure, abundance, density, monitoring, National Nature Park «Dermansko-Ostrozhskyi».

Постановка проблеми. Представники Orchidaceae є важливою складовою флористичного різноманіття природних екосистем України. Багато видів родини пов'язані зі специфічними умовами місцезростання, мають складний життєвий цикл, залежать від симбіотичних взаємозв'язків та чутливо реагують на зміни гідрологічного, світлового й ценотичного режимів. Тому для їх збереження необхідно оцінювати не лише факт наявності виду, а й стан його популяції – чисельність, щільність, онтогенетичну структуру та життєздатність.

Актуальність дослідження. Національний природний парк (НПП) «Дермансько-Острозький» площею 5448,3 га створено в 2009 році на території Рівненського району Рівненської області [1]. На території парку поєднуються лісові, лучні та болотні екосистеми, придатні для існування різних представників Orchidaceae. Список орхідей НПП налічує 19 видів. За результатами оцінки чисельності рідкісних і зникаючих видів та стану їх збереження більшість популяцій характеризується як така, що має добрий або задовільний стан [2]. Водночас окремі популяції, переважно пов'язані з водно-болотними комплексами, чутливі до зниження рівня ґрунтових вод і зміни зволоження біотопів, що зумовлює потребу в систематичному моніторингу.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження виконано в межах інвентаризації та моніторингу рідкісних видів флори НПП. Результати можуть бути використані для ведення Літопису природи, оцінки стану ключових місцезростань та планування природоохоронних заходів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Список орхідей НПП «Дермансько-Острозький» налічує 19 видів, з них *Cephalanthera longifolia* (L.) Dritsen., *Cypripedium calceolus* L., *Epipactis atrorubens* (Hoffm. ex Bernh.) Besser наводяться лише за літературними даними [3-5]; *Cephalanthera damasonium* (Mill.) Druce. – знайдена в 2020 р. поряд з територією НПП в околицях с. Буща (Мізоцький кряж Волинської височини); *Cephalanthera rubra* (L.) Rich., *Dactylorhiza incarnata* (L.) Soo., *Dactylorhiza fuchsii* (Druce) Soo., *Dactylorhiza maculata* (L.) Soo, *Dactylorhiza majalis* (Reichenb.) P.F. Hunt et Summ., *Epipactis palustris* (L.) Crantz., *Epipactis helleborine* (L.) Crantz, *Goodyera repens* (L.) R.Br., *Liparis loeselii* (L.) Rich., *Listera ovata* (L.) R. Br., *Neottia nidus-avis* (L.) Rich., *Platanthera bifolia* Rich., *Platanthera chlorantha* (Cust.) Reichenb. наводились для НПП до його створення та їх місцезростання підтверджено поточними дослідженнями 2011-2020 рр. [2-6] *Dactylorhiza traunsteineri* (Saut. ex Rchb.) Soó та *Gymnadenia conopsea* (L.) R. Br. виявлені вперше для території парку після його створення [2, 6].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Для частини видів у парку раніше фіксували лише локалітети без детальної оцінки популяцій. Для частини видів багаторічні обліки показали значні коливання чисельності, тому одноразова оцінка не може бути достатньою для визначення довгострокової тенденції.

Новизна полягає в узагальненні популяційних даних Orchidaceae НПП із порівнянням повторних досліджень окремих видів, а також у зіставленні сучасних показників інших досліджених видів.

Методологічне та загальнонаукове значення. Для дослідження стану популяції рідкісних видів рослин вивчали основні параметри популяцій – просторову структуру, вікові групи, чисельність, щільність, життєздатність [7, 8]. Збір інформації здійснювали на пробних площах і трансектах. З огляду на природоохоронний статус видів застосовували неушкоджуючі методи; вимірювання проводили безпосередньо в польових умовах. Визначали висоту генеративного пагона, довжину суцвіття, кількість прирозеткових листків, кількість квіток у суцвітті, розміри найбільшого листка. Щільність визначали як кількість особин на одиницю площі, а чисельність популяції – за середніми значеннями щільності в перерахунку на площу. Онтогенетичну структуру оцінювали за морфобіологічними ознаками особин. Розраховували індекс відновлення (IY) як частку пререгенеративних рослин та індекс генеративності (IG) як частку генеративних особин від загальної кількості рослин [7]. Матеріал опрацьовували методами варіаційної статистики за допомогою Excel; визначали середнє арифметичне (M), похибку середнього (m) та коефіцієнт варіації (V, %).

Виклад основного матеріалу. Оцінювання стану популяцій Orchidaceae на території НПП здійснювали з урахуванням як сучасних показників, так і результатів повторних обстежень постійних пробних площ. Такий підхід дає змогу відокремити короткочасні міжрічні коливання від ознак стійкої зміни стану популяцій. Нижче наводимо дані досліджень окремих видів родини Orchidaceae на території НПП в межах закладених моніторингових ділянок протягом 2020-2025 рр.

***Goodyera repens* (L.) R.Br.** для території НПП «Дермансько-Острозький» виявлено в 1991 р. в Мостівському л-ві, гербарний зразок зберігається

в Національному гербарії Інституту ботаніки України ім. М.Г. Холодного [10, 11]. В 2020 р. вид було виявлено в Мостівському л-ві, кв. 62 (лісовпорядкування 2019 р.) [12]. Ймовірно, це те ж саме місцезростання, яке виявлене в 1991 р. В 2021 році виявлено ще 2 локалітети виду – на землях ССЛВК «Острозький лісгосп»: в кв. 29 (ботанічний заказник «Бущанський») та в кв. 31 (гідрологічний заказник «Збитинський»). Вид на території НПП зростає в соснових лісах. В 2022 р. було обстежено виявлені місцезростання *Goodyera repens*. В першому локалітеті вид не виявлено; в другому обліковано 11 особин, з них 3 генеративні, 5 віргінільних, 2 іматурні, 1 ювенільна. В третьому локалітеті виявлено 3 куртини виду: перша розміром 90 х 20 см, на якій обліковано 24 особини (2 ювенільні,10 іматурних, 10 віргінільних, 1 генеративна, 1сенільна. З них 2 віргінільні, 1 іматурна зів'ялі та всихають); друга розміром 90 х 130 см, на якій обліковано 9 особини (1 ювенільна,3 іматурних, 4 віргінільних, 1 генеративна); третя розміром 250 х 250 см, на якій обліковано 54 особини (3 ювенільних, 12 іматурних, 34 віргінільних, 4 генеративних, 1 сенільна). Отже, популяційна структура виду є мозаїчною. Відсутність рослин під час окремого обліку не слід автоматично трактувати як зникнення локалітету; необхідні повторні обстеження у відповідні фенологічні строки.

***Platanthera chlorantha* (Cust.) Rchb** досліджували на пробній площі розміром 0,25 га у Мостівському лісництві, кв. 73 у дубово-грабовому лісі. У 2020 році на ділянці зафіксовано 123 особини. Детальне обстеження у 2022 році показало 119 особин, з них 54 генеративні та 65 прегенеративних. Таким чином, чисельність змінилася лише на 4 особини, або 3,3 %, що свідчить про відносну стабільність локальної популяції у цей період. Середня висота пагона на дослідженій пробній площі становила 42,3±1,37 см, кількість квіток – 12,06±0,82, листків – 2,0±0,11; ширина найбільшого листка 4,9±0,2 см, довжина найбільшого листка 15,4±0,56 см. Варіативність окремих ознак для всіх досліджуваних морфометричних параметрів ценопопуляції даного виду змінюється в межах від 17,77 % (висота пагона) до 37,26 % (кількість квіток). Отримані результати морфометричного аналізу виду свідчать про стабільний стан популяції та відповідність морфометричних параметрів природним видовим нормам. Досліджувана популяція *Platanthera chlorantha* характеризується добрим фізіологічним станом, наявністю значної кількості генеративних рослин та стабільністю основних морфометричних показників.

***Cephalanthera rubra* (L.) Rich.** досліджували в 2022 році у Здолбунівському лісництві, кв. 70 (лісовий заказник «Урочище Вільхава»). На ділянці площею 0,16 га виявлено 25 особин: 2 іматурні, 6 віргінільних (1), 9 віргінільних (2) та 8 генеративних. Частка генеративних рослин становила 32 %. Для визначення тенденції необхідні повторні обліки на тій самій ділянці.

***Neottia nidus-avis* (L.) Rich** розсіяно поширена в листяних і мішаних лісах НПП. На пробній ділянці площею 0,25 га у 2020 році було зафіксовано 35 особин, щільність становила 0,014 особин/м². Середня висота генеративного пагона становила 25,7±1,59 см, кількість квіток – 28,1±3,23, діаметр стебла – 0,43±0,03 мм. Варіативність ознак була в діапазоні 33,81-59,77 %. Повторне дослідження проведено у 2025 році. Для 30 генеративних пагонів середня висота становила 26,50 см, кількість квіток – 39,20, діаметр – 0,46 мм. Коефіцієнти варіації знизилися до 20,73-26,27 %. Отже, середня кількість квіток зросла на 39,5 %, а варіабельність усіх досліджених ознак зменшилася.

***Dactylorhiza incarnata* (L.) Soy** досліджували на заплавних луках поблизу Новомалинського водосховища на пробній площі розміром 0,8 га. Середня висота генеративного пагона становила 47,3±0,6 см, кількість квіток – 41,3±1,0 шт., довжина суцвіття – 9,6±0,2 см, довжина найбільшого листка -19,0±0,2 см, ширина найбільшого листка – 2,7±0,03 см. Середня щільність становила 6 особин/м², мінімальна – 2, максимальна – 10 особин/м². Коефіцієнт варіації морфометричних параметрів змінювався від 12,9 % для кількості листків до 39,7 % для кількості квіток. Стан популяції оцінено як задовільний, із доброю відновлювальною здатністю.

***Epipactis palustris* (L.) Crantz** в межах болотних масивів НПП «Дермансько-Острозький» була відома від початку створення установи, але детальні та систематичні дослідження її популяцій не проводились. Фіксувались лише локалітети даного виду [2, 6]. У 2022 році вперше було проведено опис популяції *Epipactis palustris* на території Бущанського болота в біотопі низинне карбонатне болото. Виявлена популяція займала значну площу на всій території Бущанського болота, тому дослідження проводились на пробній площі площею 25 м². На ділянці виявлено 57 особин, з них 10 генеративних. Середня висота становила 34,5±1,1 см, довжина суцвіття – 8,0±0,5 см, кількість квіток – 8,5±0,7, кількість листків – 6,7±0,2. Найвищий коефіцієнт варіації (38,5 %) відзначено для кількості квіток. Вікова структура мала виражене переважання прегенеративної частини: ювенільні – 7,0 %, іматурні – 26,3 %, віргінільні – 49,1 %, генеративні 17,6%. Індекс відновлення становив 82,4 %, індекс генеративності – 17,6 %. Середня щільність – 11,4 особини/м². Отже, популяція має значний потенціал відновлення, але низька частка генеративних рослин свідчить про необхідність подальшого спостереження.

***Gymnadenia conopsea* (L.) R.Br.** на території НПП вперше виявлено в 2013 р. в одному локалітеті в карбонатному низинному болоті (ботанічний заказник «Бущанський») [4]. Постійна пробна площа для моніторингу даного виду була закладена

у 2013 р. Тоді популяція нараховувала 35 генеративних особин. У 2013–2021 рр. кількість квітуючих рослин коливалася від 15 до 35. У 2015 році зафіксовано лише 15 генеративних особин, що пов'язано, ймовірно, із сухим і жарким літом.

У 2021 році середнє значення висоти пагона становило 44,6±2,1 см, довжини суцвіття – 7,3±0,6 см, кількості листків у розетці – 4,2±0,2 шт., довжини найбільшого прирозеткового листка становила 14,4±0,6 см, ширини найбільшого листка – 0,68±0,05 см. У 2022 році середній показник висоти пагона становив 43,2±1,9 см, висоти суцвіття – 10,5±0,5 см, кількості квіток у суцвіттях 24,6±1,7 шт, кількості листків 5,4±0,3 шт., довжини найбільшого листка – 14,4±0,9 см, ширини найбільшого листка – 7,8±0,3 мм. Таким чином, досліджені морфометричні показники у 2021-2022 рр. характеризувались середніми значеннями, перебували в межах норми. Це свідчить про задовільний стан популяції *Gymnadenia conopsea* в межах Бущанського болота.

Також в межах локалітету було закладено три ділянки розмірами 2 х 2 м для визначення щільності популяції *Gymnadenia conopsea* та вивчення вікової структури популяції. У 2021 р. популяція виду характеризується наступними параметрами: ювенільні особини становили 3,4 % від загальної чисельності, іматурні – 31 %, віргінільні 1 – 6,9 %, віргінільні 2 – 10,3 %, генеративні – 48,3%. Середня щільність на пробній площі становила 2,4 особини/м^2. У 2022 році популяція характеризується наступним віковим спектром: ювенільні – 6,6%, іматурні – 24 %, віргінільні 1 – 15,5 %, віргінільні 2 – 6,6 %, генеративні – 47,3%. Середня щільність в локалітуті становила 3,75 особин/м^2.

Отже, популяція *Gymnadenia conopsea* на дослідженій території має досить низьку щільність та чисельність, характеризується невисокою життєвістю та відновлювальною здатністю. Тому в найближчі роки дана популяція потребує постійного спостереження та моніторингу її основних показників.

Головні висновки. Порівняння результатів свідчить про неоднорідність стану Orchidaceae на території НПП. *Platanthera chlorantha* має найбільш переконливі ознаки локальної стабільності: чисельність на пробній площі у 2020 і 2022 рр. майже не змінилася. *Neottia nidus-avis* у 2025 році характеризувалася вищою середньою кількістю квіток і нижчою варіабельністю морфометричних ознак. Для *Gymnadenia conopsea* характерні міжрічні коливання та відсутність стійкого переважання генеративної частини. *Epipactis palustris* має високий індекс генеративності. *Goodyera repens* демонструє просторову мозаїчність локалітетів.

Важливим результатом багаторічних спостережень є підтвердження того, що чисельність генеративних рослин Orchidaceae може істотно змінюватися залежно від року, не обов'язково означаючи зміну довгострокового стану популяції. Це особливо чітко простежується на прикладі *Gymnadenia conopsea*, для якої після низького показника 2015 року надалі реєструвалися нові генеративні рослини та збільшення загальної кількості особин на облікових ділянках. Тому для оцінки тенденцій доцільно розглядати одночасно кілька показників – чисельність, щільність, частку генеративних особин, індекси відновлення та генеративності, морфометричні характеристики. Такий комплексний підхід зменшує ризик хибної оцінки стану популяції за одним показником. Для видів із складним або нестабільним надземним розвитком, зокрема *Goodyera repens* і *Neottia nidus-avis*, особливе значення мають повторні обстеження та фіксація фенологічних строків. Особливої уваги потребують болотні та лучні екосистеми. Зниження рівня ґрунтових вод і зволоженості виступає як чинник погіршення стану окремих популяцій, тому для болотних видів результати популяційного моніторингу необхідно пов'язувати зі станом самого біотопу, оскільки зміна водного режиму може впливати на всі етапи життєвого циклу рослин.

Перспективи використання результатів дослідження. Перспективним є продовження моніторингу видів родини Orchidaceae на постійних пробних площах за єдиним протоколом. Для кожної популяції доцільно щорічно або з установленим інтервалом фіксувати координати, площу локалітету, чисельність, щільність, онтогенетичний склад, кількість генеративних особин та морфометричні показники. Для болотних видів доцільно одночасно контролювати рівень ґрунтових вод і показники зволоження болота. Ключовим довгостроковим завданням є збереження не лише особин рідкісних видів, а й екологічних умов їхніх біотопів, насамперед гідрологічного режиму болотних і заплавних комплексів.

Література

1. Про створення національного природного парку „Дермансько-Острозький": *Указ Президента України* від 11 грудня 2009 року № 1039/2009. Офіційний вісник України. 2009. № 97. С. 3343.
2. Літопис природи національного природного парку «Дермансько-Острозький» за 2012-2025 рр. Том 1-9. / укладач О. В. Головко. Острог, 2013-2026. (рукопис).
3. Андрієнко Т.Л., Антонова Г.М. Флористичні знахідки на Рівненщині. *Укр. ботан. журнал.* 1986. Т.43, № 4. С. 97-101.
4. Андрієнко Т. Л., Онищенко В. А., Дацюк В. В. НПП Дермансько-Острозький. *Фіторізноманіття заповідників і національних природних парків України. Ч. 2. Національні природні парки* / за ред. В. А. Онищенка і Т. Л. Андрієнко. Київ: Фітосоціоцентр, 2012. С. 206-214.

5. Мельник В. І., Савчук Р. І., Баточенко В. М. Фітосозологічна оцінка унікального ландшафтного екотону на межі Волино-Поділля і Малого Полісся та шляхи поліпшення його охорони. *Заповідна справа в Україні на межі тисячоліть (сучасний стан, проблеми і стратегія розвитку)*: матеріали всеукраїнської загальнотеоретичної та науково-практичної конференції (м. Канів, 11-14 жовтня 1999 р.) Ред. кол. М.П. Стеценко та ін. Канів, 1999. С. 140-145.
6. Головко О. В., Кальчук Г. В., Лисюк В. М., Столяр Н.В. Знахідки рослин і грибів, занесених до Червоної книги України, на території та в околицях національного природного парку «Дермансько-Острозький». *Знахідки рослин і грибів Червоної книги та Бернської конвенції (Резолюція 6).* Т.1 (Серія: «Conservation Biology in Ukraine». Вип. 11). Київ-Чернівці: Друк Арт, 2019. С. 203-211.
7. Біологія та екологія фітопопуляцій : монографія / Ю. А. Злобін, В. Г. Скляр, Г. О. Клименко. Суми : Університетська книга, 2022. 512 с.
8. Кучерявий В.П. Екологія. Львів: Світ, 2001. 480 с.
9. Про затвердження переліків видів рослин та грибів, що заносяться до Червоної книги України (рослинний світ), та видів рослин та грибів, що виключені з Червоної книги України (рослинний світ). Наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України № 111 від 15.02.2021 (зареєстровано в Міністерстві юстиції України 23 березня 2021 р. за № 370/35992).
10. Дідух Я. П., Плюта П. Г., Каркуцієв Г. М. Екологічні режими фітоценозів на межі Волинське плато – Мале Полісся – Кременецькі гори (Рівненська область, Україна). Укр. ботан. журн. 1993. 50 (5). С. 23-34.
11. Мельник В. І. Географічне поширення, умови місцезростань і стан популяцій *Goodyera repens* (Orchidaceae) в Україні. Укр. ботан. журн. 2015. 72(4). С. 364-373.
12. Куроченко І. І., Рискова В. Г., Володимирець В. О. Біорізноманіття: Зозулинцеві (*Orchidaceae* Juss.) Рівненської області : атлас-довідник. Рівне : Волинські обереги, 2020. С. 41-43.

Дата першого надходження статті до видання: 07.09.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

УДК 598.2:574.4:551.583
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.42

ТЕРМІЧНА ЕКОЛОГІЧНА НІША ПТАХІВ ЯК ІНСТРУМЕНТ ОЦІНЮВАННЯ КЛІМАТИЧНОЇ ВРАЗЛИВОСТІ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПРИРОДООХОРОННИХ РІШЕНЬ

Никитюк Ю.А. (orcid.org/0000-0001-9142-7699),
Вискушенко Д.А. (orcid.org/0000-0002-2747-9117),
Коморна О.М. (orcid.org/0000-0003-1498-0719)
Поліський національний університет
бульв. Старий, 7, 10008, м. Житомир
andreyniks2@gmail.com

Глобальні зміни клімату є одним із провідних чинників трансформації структури біорізноманіття, що зумовлює необхідність удосконалення підходів до оцінювання чутливості видів до змін температурного режиму. Одним із перспективних напрямів є використання параметрів термічної екологічної ніші, які відображають особливості взаємодії виду з температурним середовищем і можуть слугувати інструментом інтегральної оцінки його потенційної реакції на кліматичні зміни.

Метою роботи є розроблення та методологічне обґрунтування інтегрального використання параметрів термічної екологічної ніші птахів для оцінювання термічно зумовленої складової їх кліматичної вразливості та визначення можливостей застосування отриманих результатів під час обґрунтування природоохоронних рішень.

Робота ґрунтується на результатах попередніх досліджень термічної екологічної ніші птахів Житомирської області та їх подальшій інтегральній екологічній інтерпретації. Основну увагу зосереджено на комплексному аналізі трьох взаємодоповнюючих параметрів термічної екологічної ніші (термічного оптимуму, ширини температурної толерантності та асиметрії температурного відгуку) і їх використанні для оцінювання термічної спеціалізації видів.

Зазначено, що інтегральне використання відповідних параметрів забезпечує більш повну оцінку потенційної чутливості птахів до кліматичних змін порівняно з аналізом окремих температурних характеристик. Запропоновано концептуальну схему інтегральної оцінки термічної спеціалізації та здійснено екологічну інтерпретацію трьох узагальнених типів термічної спеціалізації птахів, які відрізняються прогнозованою реакцією на подальше потепління. Обґрунтовано доцільність використання інтегрального аналізу параметрів термічної екологічної ніші для оцінювання кліматичної вразливості видів, прогнозування можливих змін структури орнітофауни та наукового обґрунтування природоохоронних рішень. *Ключові слова:* термічна екологічна ніша, птахи, глобальні зміни клімату, термічна спеціалізація, температурна толерантність, асиметрія температурного відгуку, кліматична вразливість, природоохоронні рішення.

Thermal ecological niche of birds as a tool for assessing climate vulnerability and supporting conservation decisions. Nykytiuk Yu., Vyskushenko D., Komorna O.

Climate change is one of the major drivers of biodiversity transformation, creating a need for improved approaches to assessing species sensitivity to changing thermal conditions. One promising approach is the use of thermal ecological niche parameters, which characterize the relationship between species and the thermal environment and can serve as a tool for the integrated assessment of their potential responses to climate change.

The aim of this study was to develop and provide a methodological justification for the integrated use of thermal ecological niche parameters to assess the thermally driven component of bird species' climate vulnerability and to determine the potential application of the obtained results in supporting conservation decisions.

The study builds upon previous investigations of the thermal ecological niche of birds in the Zhytomyr Region (Ukraine) and extends them through an integrated ecological interpretation. Particular attention is paid to the combined analysis of three complementary parameters of the thermal ecological niche (thermal optimum, thermal tolerance breadth, and asymmetry of the thermal response) and their application to the assessment of species' thermal specialization.

The results demonstrate that the integrated consideration of these parameters provides a more comprehensive assessment of birds' potential sensitivity to climate change than the analysis of individual thermal characteristics. A conceptual framework for the integrated assessment of thermal specialization is proposed, and three generalized types of thermal specialization differing in their predicted responses to future climate warming are ecologically interpreted. The proposed approach may be applied to the assessment of species' climate vulnerability, prediction of potential changes in avifaunal structure, and scientific support for biodiversity conservation and environmental decision-making. *Key words:* thermal ecological niche, birds, climate change, thermal specialization, thermal tolerance, thermal response asymmetry, climate vulnerability, conservation decisions.

Постановка проблеми. Глобальні зміни клімату належать до ключових чинників трансформації сучасного біорізноманіття. Підвищення температури повітря змінює умови існування видів, впливає на їх просторове поширення, сезонну активність, успішність розмноження та структуру угруповань.

© Никитюк Ю.А., Вискушенко Д.А., Коморна О.М., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Водночас реакція птахів на ці процеси є неоднаковою і визначається особливостями їх екологічної спеціалізації.

Одним із найбільш інформативних підходів до оцінювання такої реакції є аналіз термічної екологічної ніші, яка відображає температурні умови існування виду, межі його толерантності та характер екологічного відгуку на зміну температури. У цьому контексті чутливість розглядається як одна зі складових кліматичної вразливості виду, що характеризує особливості його реакції на зміну температурних умов, тоді як комплекс параметрів термічної екологічної ніші дає змогу оцінити саме термічно зумовлену складову такої вразливості [1]. Інтегральне врахування цих характеристик створює підґрунтя для обґрунтованого прогнозування можливих змін орнітофауни в умовах подальшого потепління. Незважаючи на значний розвиток кліматично орієнтованих досліджень, комплексне використання параметрів термічної екологічної ніші для оцінювання вразливості птахів і досі залишається недостатньо розробленим, що й зумовило актуальність розроблення інтегрального підходу до оцінювання термічно зумовленої складової їх кліматичної вразливості.

Актуальність дослідження. Глобальні зміни клімату вже впливають на поширення видів, сезонні ритми та структуру біотичних угруповань, а подальше зростання температури посилюватиме ризики втрати придатних умов існування для частини наземної біоти [1]. За таких обставин особливого значення набуває не лише фіксація змін у складі й поширенні орнітофауни, а й завчасне визначення видів, потенційно найбільш чутливих до перебудови температурного режиму. Однією з інформативних основ такого оцінювання є термічна екологічна ніша, параметри якої відображають положення виду в температурному градієнті та широту прийнятних для нього умов. Дослідження показують, що характер сучасних змін ареалів птахів пов'язаний із шириною їхньої кліматичної ніші, однак використання лише одного її показника не дає змоги повною мірою врахувати відмінності між видами [2]. Тому актуальним є комплексне оцінювання термічного оптимуму, толерантності та асиметрії відгуку як взаємопов'язаних характеристик, здатних уточнити потенційну чутливість птахів до глобальних змін клімату.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Представлена стаття розвиває результати попередніх досліджень термічної екологічної ніші птахів та оцінювання наслідків глобальних змін клімату для орнітофауни [3]. У цій роботі основну увагу зосереджено на методологічному обґрунтуванні інтегрального використання параметрів термічної екологічної ніші для оцінювання термічно зумовленої складової кліматичної вразливості видів. Отримані результати можуть бути використані під час прогнозування змін біорізноманіття, удосконалення програм екологічного моніторингу та наукового обґрунтування природоохоронних заходів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Реакція орнітофауни на сучасні кліматичні зміни є одним із найбільш досліджуваних напрямів екології останніх років. Основна увага при цьому приділяється трансформації ареалів, змінам фенологічних характеристик, перебудові структури угруповань та адаптації видів до нових температурних умов. Результати багаторічних спостережень за птахами Північної Америки свідчать, що пристосування до потепління значною мірою відбувається завдяки зміщенню строків розмноження, тоді як просторові переміщення відіграють менш помітну роль [4]. Водночас результати масштабного аналізу просторової динаміки 378 видів європейських птахів показали, що локальні колонізації та зникнення значною мірою визначаються не лише зміною кліматичної придатності територій, а й комплексом екологічних чинників та видових особливостей [5]. Таким чином, сучасні дослідження переконливо демонструють складний і багатофакторний характер реакції птахів на зміну клімату.

Одним із найбільш перспективних напрямів аналізу таких процесів є використання концепції кліматичної екологічної ніші. Її параметри характеризують не лише положення виду вздовж температурного градієнта, а й межі умов, у яких можливе його тривале існування. Особливий інтерес викликає ширина кліматичної ніші, оскільки саме вона значною мірою визначає потенційну екологічну пластичність видів. Доведено, що птахи з вузькою кліматичною нішею демонструють виразніші зміни просторового поширення в умовах сучасного потепління порівняно з видами широкої кліматичної спеціалізації [2]. На глобальному рівні ширина кліматичної ніші також пов'язана з міграційною поведінкою, положенням виду у кліматичному просторі та його функціональними характеристиками [6]. Це свідчить про те, що параметри кліматичної ніші відображають фундаментальні екологічні властивості виду, а не лише особливості його сучасного поширення.

Попри активний розвиток біокліматичного моделювання, більшість досліджень використовує характеристики кліматичної ніші переважно для прогнозування можливих змін ареалів. Значно рідше вони розглядаються як самостійний інструмент оцінювання екологічної чутливості видів до зміни температурного режиму. Водночас зміни середніх температурних характеристик угруповань уже застосовують для аналізу довготривалих трансформацій орнітофауни. Показано, що функціонально різноманітні угруповання можуть характеризуватися меншою мінливістю середньої термічної ніші, хоча прояв цього взаємозв'язку залежить від сезону спостережень [7]. Крім того, результати палеоекологічних реконструкцій засвідчили, що холодолюбні види реагували на

кліматичні коливання істотно сильніше, ніж птахи, пов'язані з помірнішими температурними умовами [8].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Наявні дослідження підтверджують інформативність термічного оптимуму та ширини толерантності для характеристики кліматичної приуроченості птахів. Водночас ці параметри найчастіше аналізують окремо або використовують переважно для групування видів і прогнозування просторових змін їхніх ареалів. Такий підхід не повністю враховує форму відгуку виду вздовж температурного градієнта. Зокрема, близькі значення оптимуму можуть поєднуватися з неоднаковою толерантністю, а подібна ширина термічної ніші – з різним напрямом та ступенем асиметрії реакції.

Недостатньо опрацьованим залишається комплексне співвіднесення термічного оптимуму, ширини толерантності й асиметрії відгуку як взаємопов'язаних характеристик екологічної ніші. Не визначено повною мірою й те, наскільки їх спільне використання дає змогу диференціювати види за потенційною чутливістю до зміни температурного режиму. Розв'язання цієї частини проблеми потребує переходу від оцінювання окремих показників до інтегрованого аналізу їх поєднань, що може уточнити екологічну інтерпретацію реакції птахів на глобальні зміни клімату.

Новизна. Наукова новизна роботи полягає у методологічному обґрунтуванні інтегрального використання параметрів термічної екологічної ніші для оцінювання термічно зумовленої складової кліматичної вразливості птахів. На відміну від попередніх досліджень, у яких основну увагу було зосереджено на кількісному визначенні параметрів термічної ніші та класифікації видів, у роботі запропоновано підхід до їх комплексної екологічної інтерпретації на основі поєднання термічного оптимуму, ширини температурної толерантності та асиметрії температурного відгуку. Це дало змогу розглядати термічну спеціалізацію як інтегральну характеристику потенційної чутливості видів до кліматичних змін і запропонувати концептуальну схему її використання для екологічного обґрунтування прогнозних та природоохоронних рішень.

Методологічне та загальнонаукове значення. Запропонований підхід розвиває методичні можливості оцінювання кліматичної чутливості птахів шляхом комплексного аналізу параметрів термічної екологічної ніші та може бути використаний під час дослідження інших таксономічних груп організмів. У загальнонауковому аспекті результати роботи сприяють удосконаленню кількісних підходів до аналізу екологічних систем і відповідають сучасним тенденціям розвитку методології екологічних досліджень, спрямованої на інтеграцію екологічних показників у систему наукового обґрунтування природоохоронних рішень [9].

Викладення основного матеріалу. Глобальні зміни клімату неоднаково впливають на різні види птахів, що зумовлено особливостями їх екологічної спеціалізації. Тому оцінювання потенційної реакції орнітофауни доцільно ґрунтувати не лише на аналізі сучасного поширення видів або окремих кліматичних показників, а й на характеристиках, які відображають особливості взаємодії видів з температурним середовищем. Однією з таких характеристик є термічна екологічна ніша [2, 6].

Методичною основою роботи стали результати попереднього дослідження термічної екологічної ніші птахів Житомирської області [3], у межах якого параметри реакції видів на градієнт середньорічної температури визначали за допомогою β-функції, а екологічні групи виокремлювали методом кластерного аналізу Варда. У цій роботі зазначені результати використано для інтегральної екологічної інтерпретації термічного оптимуму, ширини температурної толерантності та асиметрії температурного відгуку, яку в базовому дослідженні кількісно описували показником форми кривої (куртозисом).

Термічна екологічна ніша характеризує положення виду в температурному градієнті та визначає межі умов, у яких забезпечується його стале існування. Інтегральний підхід ґрунтується на використанні трьох взаємодоповнювальних параметрів термічної екологічної ніші: термічного оптимуму, ширини температурної толерантності та асиметрії температурного відгуку. Термічний оптимум визначає найбільш сприятливі температурні умови для виду, ширина толерантності характеризує діапазон прийнятних температур, а асиметрія показує особливості реакції виду на відхилення від оптимальних умов.

Кожен із наведених показників має самостійне екологічне значення, проте їх ізольоване використання не дозволяє повною мірою оцінити потенційну чутливість видів до кліматичних змін. Види зі схожим температурним оптимумом можуть істотно відрізнятися шириною толерантності, тоді як подібна толерантність не завжди супроводжується однаковою реакцією на підвищення або зниження температури. Тому оцінювання термічної спеціалізації повинно базуватися на інтегральному аналізі всіх параметрів термічної екологічної ніші [2, 6].

Такий підхід забезпечує перехід від опису окремих температурних характеристик до комплексної оцінки екологічної стратегії виду. Поєднання термічного оптимуму, ширини толерантності та асиметрії відгуку створює основу для порівняння видів між собою, визначення рівня їх термічної спеціалізації та прогнозування потенційної реакції на подальшу трансформацію кліматичних умов. Концептуальну схему такого підходу наведено на рис. 1.

Запропонована схема ілюструє послідовність переходу від окремих параметрів термічної екологічної ніші до інтегральної оцінки екологічної спеці-



Рис. 1. Концептуальна схема інтегральної оцінки термічної спеціалізації птахів для прогнозування їх реакції на зміну клімату

алізації виду. Її принциповою особливістю є розгляд термічного оптимуму, ширини толерантності та асиметрії температурного відгуку як взаємопов'язаних параметрів, екологічне значення яких проявляється лише в їх комплексному поєднанні. Це дає змогу уникнути спрощених висновків, характерних для аналізу кожного показника окремо.

Подібність видів за одним із параметрів термічної екологічної ніші ще не означає подібності їх екологічних властивостей [2]. Наприклад, однаковий термічний оптимум може поєднуватися як із широкою, так і з вузькою температурною толерантністю, тоді як схожі межі толерантності не завжди супроводжуються однаковою реакцією на підвищення температури. Саме тому інтегральний аналіз усіх параметрів термічної екологічної ніші дозволив перейти від порівняння окремих показників до оцінювання загальної подібності видів, виділення груп із близькими особливостями термічної спеціалізації та їх екологічного узагальнення.

В основу виділення груп покладено результати кластерного аналізу, отримані в попередніх дослідженнях [3], які використано для їх подальшої інтегральної екологічної інтерпретації. На відміну від традиційного порівняння окремих показників, кластеризація дала можливість виявити типові поєднання характеристик, що відображають різні варіанти термічної спеціалізації видів. У результаті було виокремлено три основні екологічні групи, які відрізняються рівнем термічної спеціалізації та потенційною реакцією на подальшу зміну клімату [3]. Виділені групи слід розглядати не як жорсткі таксономічні категорії, а як узагальнені типи термічної спеціалізації, що відображають подібність екологічних стратегій видів.

Серед виділених екологічних груп найбільш сприятливий прогноз в умовах подальшого підвищення температури характерний для стенотопних мегатермів. До цієї групи належать, зокрема, одуд (*Upupa epops*), лелека білий (*Ciconia ciconia*) та журавель сірий (*Grus grus*). Незважаючи на відносно вузьку температурну толерантність, представники цієї групи характеризуються високим термічним оптимумом, що відповідає сучасному напряму кліматичних змін. За таких умов саме положення оптимуму набуває визначального значення, тоді як обмежена ширина термічної ніші не нівелює загалом сприятливого прогнозу для цієї групи. Для більшості її представників асиметрія температурного відгуку не змінює загальної спрямованості прогнозу, проте уточнює характер їх реакції поблизу верхніх меж температурної толерантності.

Отже, для стенотопних мегатермів прогнозовані кліматичні зміни загалом є сприятливими, що визначається саме інтегральною конфігурацією термічної ніші, а не окремими її параметрами.

Інший варіант термічної спеціалізації представлений евритопними мезотермами. На відміну від попередньої групи, їх характеризує не зміщення термічного оптимуму до високих температур, а поєднання помірних оптимальних умов існування з широким діапазоном температурної толерантності. Саме ця

особливість зменшує залежність видів від окремих температурних коливань.

Екологічне значення цієї групи полягає насамперед у високій екологічній пластичності, що забезпечує відносну стійкість видів у широкому спектрі температурних умов. Порівняння зі стенотопними мегатермами показує, що подібний рівень потенційної стійкості може досягатися різними шляхами. Якщо для стенотопних мегатермів вирішальним чинником є високий термічний оптимум, то для евритопних мезотерм – широка температурна толерантність. Це підтверджує, що оцінювання реакції видів на кліматичні зміни повинно ґрунтуватися на комплексному аналізі структури термічної екологічної ніші.

Третю групу формують стенотопні мікротерми, для яких прогнозована реакція на подальше підвищення температури є найменш сприятливою. Характерними представниками цієї групи є орябок (*Tetrastes bonasia*), сич волохатий (*Aegolius funereus*) та жовна сива (*Picus canus*). На відміну від мегатермів, їх термічний оптимум зміщений у бік нижчих температур, а вузька температурна толерантність підвищує чутливість до змін температурного режиму.

Саме ця група найбільшою мірою відображає потенційні ризики, пов'язані зі зміною клімату. Поєднання низького термічного оптимуму, вузької температурної толерантності та особливостей асиметрії температурного відгуку формує тип термічної спеціалізації, що характеризується найвищою прогнозованою вразливістю до потепління. Це дає змогу розглядати стенотопних мікротермів як пріоритетний об'єкт подальшого екологічного моніторингу.

Порівняння трьох виділених груп показує, що прогнозована реакція птахів на кліматичні зміни визначається не окремими параметрами термічної екологічної ніші, а характером їх поєднання. Інтегральний аналіз дає змогу виявити різні типи термічної спеціалізації та пояснити відмінності у потенційній стійкості видів до подальшого потепління.

Узагальнену характеристику виділених екологічних груп наведено в табл. 1. Їх екологічна інтерпретація ґрунтується на комплексному врахуванні термічного оптимуму, ширини температурної толерантності та асиметрії температурного відгуку.

Головні висновки. У роботі обґрунтовано доцільність інтегрального використання параметрів термічної екологічної ніші для характеристики чутливості птахів до зміни температурних умов та оцінювання термічно зумовленої складової їх кліматичної вразливості. Показано, що найбільш інформативним є комплексний аналіз термічного оптимуму, ширини толерантності та асиметрії температурного відгуку, тоді як ізольоване використання окремих показників не забезпечує достатньо повної екологічної інтерпретації.

Потенційна реакція видів визначається насамперед поєднанням параметрів термічної екологічної ніші. Запропонований підхід дав змогу виокремити екологічні групи, які відрізняються рівнем термічної спеціалізації та прогнозованою чутливістю до потепління.

Найсприятливіші перспективи в умовах сучасних кліматичних змін мають стенотопні мегатерми, тоді як найвища прогнозована вразливість до потепління характерна для стенотопних мікротермів. Евритопні мезотерми характеризуються найвищою екологічною пластичністю, що забезпечує їм відносну стійкість у широкому діапазоні температурних умов.

Запропонований підхід може бути використаний для прогнозування змін орнітофауни, оцінювання кліматичної вразливості видів та наукового обґрунтування природоохоронних рішень.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати створюють основу для подальшого розвитку підходів до оцінювання кліматичної вразливості орнітофауни на основі інтегрального аналізу параметрів термічної екологічної ніші. Перспективними напрямами

Таблиця 1

Інтегральна характеристика основних типів термічної спеціалізації птахів та їх прогнозованої реакції на зміну клімату

Екологічна група	Домінуюча конфігурація термічної ніші	Прогнозована реакція	Екологічна інтерпретація
Стенотопні мегатерми	Високий оптимум, вузька толерантність; асиметрія уточнює видоспецифічну реакцію	Переважно сприятлива	Сприятливий прогноз визначається відповідністю оптимуму напряму потепління
Евритопні мезотерми	Помірний оптимум, широка толерантність; найбільш виражена мінливість форми відгуку	Відносно стабільна	Широка температурна толерантність забезпечує відносну стійкість
Стенотопні мікротерми	Низький оптимум, вузька толерантність; форма відгуку уточнює ступінь ризику	Найбільш несприятлива	Поєднання холодолюбності та вузької толерантності зумовлює підвищену чутливість до потепління

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

є апробація запропонованого підходу в інших регіонах України, його адаптація для різних таксономічних груп тварин, а також інтеграція показників термічної спеціалізації з характеристиками оселищ, землекористування та сценаріями регіональних кліматичних змін. Це сприятиме підвищенню обґрунтованості прогнозів трансформації біорізноманіття, удосконаленню системи екологічного моніторингу та підтримці прийняття природоохоронних і управлінських рішень.

Література

1. IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp. URL:https://doi.org/10.1017/9781009325844
2. Hällfors M. H., Heikkinen R. K., Kuussaari M., Lehikoinen A., Luoto M., Pöyry J., Virkkala R., Saastamoinen M., Kujala H. Recent range shifts of moths, butterflies, and birds are driven by the breadth of their climatic niche. *Evolution Letters*. 2024. Vol. 8, No. 1. P. 89–100. URL: https://doi.org/10.1093/evlett/qrad004.
3. Tkachuk R., Nykytiuk Y., Komorna O., Kravchenko O., Zymaroieva A. Ecological groups of birds of Zhytomyr region (Ukraine) in relation to thermal regime and their future prospects in the context of global climate change. *Biosystems Diversity*. 2024. Vol. 32, No. 4. P. 510–521. URL: https://doi.org/10.15421/012432.
4. Neate-Clegg M. H. C., Tonelli B. A., Tingley M. W. Advances in breeding phenology outpace latitudinal and elevational shifts for North American birds tracking temperature. *Nature Ecology & Evolution*. 2024. Vol. 8. P. 2027-2036. URL:https://doi.org/10.1038/s41559-024-02536-z.
5. Howard C., Marjakangas E.-L., Morán-Ordóñez A. et al. Local colonisations and extinctions of European birds are poorly explained by changes in climate suitability. *Nature Communications*. 2023. Vol. 14. Article 4304. URL:https://doi.org/10.1038/s41467-023-39093-1.
6. Rodrigues J. F. M., Botero C. A. The global determinants of climate niche breadth in birds. *Nature Communications*. 2025. Vol. 16. Article 3685. URL:https://doi.org/10.1038/s41467-025-58815-1.
7. Marjakangas E.-L., Santangeli A., Johnston A., Michel N. L., Princé K., Lehikoinen A. Effects of diversity on thermal niche variation in bird communities under climate change. Scientific Reports. 2022. Vol. 12. Article 21810. URL:https://doi.org/10.1038/s41598-022-26248-1.
8. Carrera L., Pavia M., Varela S. Birds adapted to cold conditions show greater changes in range size related to past climatic oscillations than temperate birds. Scientific Reports. 2022. Vol. 12. Article 10813. URL: https://doi.org/10.1038/s41598-022-14972-7.
9. Вискушенко Д. А., Никитюк Ю. А., Піціль А. О., Мельник Н. В. Теоретичні та методичні основи наукового дослідження в екологічній освіті. *Екологічні науки*. 2025. Вип. 63. С. 9-14. URL: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.6-63.1.

Дата першого надходження статті до видання: 24.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

УДК 57.085
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.43

ЗБЕРЕЖЕННЯ *HERICIUM CORALLOIDES* (*RUSSULALES*) НА ТЕРИТОРІЇ НАЦІОНАЛЬНОГО ПРИРОДНОГО ПАРКУ «ГУЦУЛЬЩИНА»: *IN SITU* ТА *RE-SITU* РЕЗУЛЬТАТИ

Пасайлюк М.В.[1] (orcid.org/0000-0001-6103-1247),
Фокшей С.І.[1] (orcid.org/0000-0001-5730-3617),
Держипільський Л.М.[1] (orcid.org/0009-0009-4259-4947),
Сухомлин М.М.[2](orcid.org/0000-0001-6573-9699)
[1]Національний природний парк «Гуцульщина»
вул. Дружби, 84, м. Косів
[2]ДУ «Інститут еволюційної екології НАН України»
вул. Лебедєва, 37, 03143, Київ
mariia.pasailiuk@gmail.com; stellaannafr@gmail.com;
derzlm43@gmail.com, suhmary@ukr.net

У статті представлено узагальнені результати комплексних 20-річних досліджень рідкісного гриба *Hericium coralloides* на території Національного природного парку «Гуцульщина». *Hericium coralloides* є вразливим видом, включеним до Червоної книги України, що обумовлює високу актуальність пошуку дієвих шляхів його збереження. Досліджуваний вид екологічно приурочений до букових та ялицево-букових пралісів і старих лісів, де наявна достатня кількість мертвої деревини великих розмірів. Встановлено, що плодові тіла макроміцета трапляються групами переважно на відмерлій деревині бука лісового (*Fagus sylvatica* L.) – на колодах, пнях, повалених стовбурах та сухостійних деревах. На території НПП «Гуцульщина» *H. coralloides* вперше виявили у 2005 році, і на той момент вид реєстрували лише в одному локалітеті.

З метою ефективного збереження популяцій макроміцета та його успішного відтворення у природних умовах науковцями було розроблено та впроваджено «Програму охорони, збереження та відтворення рідкісних макроміцетів» – метод *re-situ*. Цей підхід передбачає виконання кількох послідовних етапів: регулярні моніторингові дослідження природних місцезростань *H. coralloides* та аналіз його біологічних і екологічних характеристик; введення в чисту культуру аборигенних штамів гриба з подальшим дослідженням їхніх культуральних властивостей; вивчення типів міжвидової взаємодії в умовах прямої конфронтації із культурами конкурентних деревних макроміцетів; нарощування якісного посівного інокуляту *H. coralloides* на спеціально підібраних комбінованих рослинних субстратах і моделювання умов для отримання повноцінних плодових тіл гриба у лабораторній культурі; підбір, закладання експериментальних мікологічних відтворювальних ділянок для *H. coralloides* у лісових масивах, а також їх тривалий подальший моніторинг на предмет регулярного виявлення плодових тіл у місцях відтворення.

За результатами багаторічних моніторингових досліджень *in situ* станом на сьогодні в межах парку виявлено та задокументовано 43 природних місцезростання гриба, хоча плодоношення в їхніх межах не є систематичним і сильно залежить від гідротермічних факторів сезону та достатньої кількості субстрату. Водночас у ході реалізації відтворювальних активностей зафіксовано позитивний результат застосування методу *re-situ*. Зокрема, підтверджено стабільне плодоношення *H. coralloides* в одній експериментальній локації (на штучно інокульованій колоді бука лісового) в межах хребта Каменистий у 2016, 2017, 2018 та 2024 роках. Важливим досягненням стало те, що під час моніторингу за 50 метрів від цієї *re-situ* локації виявлено новий природний локалітет *H. coralloides*, який реєструється починаючи з 2023 року. На основі отриманих просторових даних авторами висунуто припущення, що успішне розселення та подальше природне поширення спор макроміцета у суміжних лісових біотопах відбулося саме із популяційного осередку, штучно відтвореного за допомогою методу *re-situ*. *Ключові слова: Hericium coralloides*, метод *re situ*, мікологічні відтворювальні ділянки, природні локалітети.

Conservation of *Hericium coralloides* (Russulales) within the Territory of the National Natural Park «Hutsulshchyna»: *In Situ* and *Re-Situ* Results Pasailiuk M., Fokshei S., Derzhypilskyi L., Sukhomlyn M.

The article presents the generalized results of comprehensive 20-year research on the rare fungus *Hericium coralloides* (Ehnh.: Fr.) S. F. Gray within the territory of the «Hutsulshchyna» National Nature Park. *Hericium coralloides* is a vulnerable species included in the Red Data Book of Ukraine, which underscores the high urgency of finding effective pathways for its conservation. The studied species is ecologically associated with old-growth beech and silver fir-beech primeval and ancient forests containing a sufficient amount of large-sized deadwood. It has been established that the fruit bodies of the macromycete occur in groups, predominantly on the deadwood of European beech (*Fagus sylvatica* L.) – specifically on logs, stumps, fallen trunks, and standing dead trees. Within the territory of the «Hutsulshchyna» National Nature Park, *H. coralloides* was first discovered in 2005, at which time the species was recorded in only one locality.

To ensure the effective conservation of the macromycete populations and its successful reproduction under natural conditions, the institution's scientists developed and implemented the «Program for the Protection, Conservation, and Reproduction of Rare

© Пасайлюк М.В., Фокшей С.І., Держипільський Л.М., Сухомлин М.М., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Macromycetes» using the *re-situ* method. This approach involves several consecutive stages: regular monitoring studies of the natural habitats of *H. coralloides* and the analysis of its biological and ecological characteristics; introducing indigenous fungal strains into pure culture, followed by the investigation of their cultural properties; studying the types of interspecific interaction under conditions of direct confrontation with cultures of competing wood-decaying macromycetes; scaling up high-quality *H. coralloides* seed inoculum on specially selected combined plant substrates and modeling conditions to obtain fully developed fungal fruit bodies in laboratory culture; selecting and establishing experimental mycological reproductive plots for *H. coralloides* in forest stands, as well as their long-term subsequent monitoring for the regular detection of fruit bodies at the reproduction sites.

Based on the results of long-term *in situ* monitoring research to date, 43 natural habitats of the fungus have been discovered and documented within the national park, although direct fruiting within their boundaries is non-systematic and heavily dependent on the hydrothermal factors of the season. At the same time, during the implementation of reproductive activities, a significant positive outcome of applying the *re-situ* method was recorded. In particular, stable fruiting of *H. coralloides* was confirmed in one experimental location (on an artificially inoculated log of European beech) within the Kamienistyi Ridge in 2016, 2017, 2018, and 2024. A major scientific achievement was that during monitoring 50 meters away from this *re-situ* location, a new natural locality of *H. coralloides* was discovered, which has been recorded starting from 2023. Based on the obtained spatial data, the authors put forward a well-founded assumption that the successful dispersal and subsequent natural spread of the macromycete spores into adjacent forest biotopes originated precisely from the population center artificially restored via the *re-situ* method. *Key words: Hericium coralloides*, *re-situ* method, mycological reproductive plots, natural localities.

Постановка проблеми. *Hericium coralloides* (Scop.) Pers. є реліктовим диз'юнктивно-ареальним видом помірної зони Євразії та Північної Америки, який належить до родини Hericiaceae (порядок Russulales). Вид включений до Червоної книги України [1–3], перебуває під охороною у багатьох європейських країнах [4], що свідчить про його природоохоронну цінність. Незважаючи на відносно широку географію поширення, гриб характеризується спорадичним плодоношенням, невеликою кількістю підтверджених локалітетів та високою залежністю від старовікових лісових екосистем із достатньою кількістю мертвої деревини [5 – 7]. У зв'язку з деградацією таких біотопів, інтенсивним веденням лісового господарства та нерегулярним плодоношенням виду виникає проблема ефективного збереження його природних популяцій і розроблення дієвих методів відтворення.

Актуальність дослідження. Актуальність дослідження визначається необхідністю збереження одного з рідкісних видів макроміцетів України, який є індикатором старовікових лісів [6]. Водночас останніми роками значно зріс інтерес до *H. coralloides* як перспективного джерела біологічно активних сполук із антиоксидантною [8], протипухлинною [9], противірусною [10] та гіполіпідемічною активністю [11]. Поєднання високої природоохоронної та біотехнологічної цінності виду обумовлює необхідність пошуку ефективних методів його збереження та відтворення в природних умовах. Саме тому особливого значення набуває апробація технології re-situ як сучасного підходу до охорони рідкісних грибів [12, 13].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження виконано в рамках «Програми охорони, збереження та відтворення рідкісних макроміцетів» НПП «Гуцульщина» [12] та Програми Літопису природи. Робота спрямована на виконання державних природоохоронних завдань щодо збереження видів, занесених до Червоної книги України, а також відповідає сучасним напрямам розвитку природоохоронної біології, мікології та біотехнології. Практичне значення дослідження полягає у розробленні та перевірці ефективності технології re-situ для відтворення *H. coralloides* у природних умовах [13].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Поширення *H. coralloides* в Україні висвітлено у дослідженнях, присвячених окремим природно-заповідним територіям України [14 – 19].

Найбільш повний аналіз сучасного поширення виду виконано М.В. Шевченко зі співавторами, які узагальнили літературні дані з 1932 року та власні матеріали, встановивши понад 100 місцезростань виду в Україні [20].

Численні дослідження підтверджують тісний зв'язок *H. coralloides* зі старовіковими лісами, наявністю великої кількості мертвої деревини та мінімальним антропогенним впливом [5 – 7]. Крім екологічних особливостей, останніми роками активно досліджуються харчова цінність і фармакологічний потенціал гриба [8 – 11]. У зв'язку з цим значна увага приділяється розробленню технологій культивування та відтворення виду [12, 13].

Відмітимо, що питання відтворення та стимуляції плодоношення певних видів грибів у природних, неконтрольованих людиною умовах, хвилює мікологів щонайменше останні два десятки років. Так, у 2008 році був описаний досвід відтворення *H. coralloides* у природних умовах. Crockatt [21] повідомляла, що в її експерименті дубові штифти (паличкоподібної форми), колонізовані міцелієм *H. coralloides*, були інокульовані в деревину 15 живих букових дерев та 3 ясенів. Плодові тіла гриба автор не фіксувала, проте той факт, що міцелій *H. coralloides* успішно колонізував субстрат – живі букові дерева – довела за допомогою молекулярних методів. Wainhouse, Boddy [22] у своїх дослідженнях успішно інокулювали деревину бука лісового міцелієм *Hericium erinaceus* (Bull.) Pers. з метою прискорення формування дупел у дерев для подальшого їх заселення рідкісними видами фауни та для збереження локально вимерлого виду *H. erinaceus.*

Спроби культивування грибів у дикій природі описані також для інших видів, не тільки представ-

ників роду *Hericium* Pers. Зокрема Choi et al. [23] повідомляли про успішне культивування *Polyporus umbellatus* (Pers.) Fr. Склероції *P. umbellatus* культивували двома методами, такими як закопування та вкорінення. Знову ж таки, плодових тіл автори не спостерігали. Piętka, Grzywacz [24] повідомляли про відтворення *Fomitopsis officinalis* (Vill.) Bondartsev & Singer. Оброслі міцелієм щіпки тріски ядрової деревини модрини, підготовлені в лабораторії, виносили у природу на дві модрини, що ростуть в санаторному заповіднику Рудка (Республіка Польща) та використовували *in-situ* як інокуляти. Штучне зараження було успішним: живий міцелій *F. officinalis* був зафіксований в обох зрізаних зразках дерев після трьох років експерименту. Автори сподівалися, що карпофори цього рідкісного гриба будуть утворені пізніше.

Колектив японських авторів досліджував вплив електричної стимуляції на формування плодових тіла при культивуванні грибів *Lentinula edodes* (Berk.) Pegler, *Pholiota nameko* (T. Itô) S. Ito & S. Imai та *Naematoloma sublateritium (Fr.)* P. Karst. на колодах дерев у природних умовах і довів, що напруга у 50 та 100 кВ збільшує вагу сформованих плодових тіл у 1,3-2,0 рази [25].

Використовуючи електричну стимуляцію у природних умовах можна не тільки збільшити вагу (на 67% та на 69% у першому у другому врожаї відповідно) та розміри (на 65-113%) плодових тіл *Tricholoma matsutake* (S. Ito & S. Imai) Singer але й збільшити кількість грибів більш ніж удвічі на відповідній ділянці [26].

Таким чином, спроби відтворення грибів у природних умовах різних країн переважно стосуються видів, які мають важливе медико-біологічне та нутрієнтне значення.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття. Попри значну кількість відомостей щодо поширення, екології та біологічно активних властивостей *H. coralloides* недостатньо досліджено ефективність практичного відтворення виду безпосередньо у природних умовах. Залишається відкритим питання оцінки довготривалої результативності застосування методики *re-situ*, визначення оптимальних умов для її впровадження та формування науково обґрунтованих рекомендацій щодо використання цього підходу для охорони рідкісних макроміцетів.

Новизна. Наукова новизна роботи полягає у представленні результатів двадцятирічного моніторингу природних популяцій *H. coralloides* на території НПП «Гуцульщина», оцінці ефективності застосування методики *re-situ* для відтворення виду в природних умовах та узагальненні практичного досвіду використання аборигенних штамів у природоохоронній діяльності. Отримані результати розширюють сучасні уявлення про можливості практичного збереження рідкісних видів макроміцетів.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічною основою дослідження є комплексний підхід, який поєднує польовий моніторинг природних місцезростань (*in situ*), введення аборигенних штамів у чисту культуру та їх лабораторне дослідження (*ex situ*), а також практичне відтворення виду у природному середовищі із врахуванням результатів моніторингу та культивування – *re-situ*. Такий підхід забезпечує інтеграцію методів природоохоронної мікології, культивування грибів та екологічного моніторингу. Запропонована схема може бути використана як модель для охорони інших рідкісних видів дереворуйнівних макроміцетів, занесених до Червоної книги України та регіональних природоохоронних списків.

Виклад основного матеріалу. В рамках проведених моніторингових досліджень упродовж 2005 – 2025 рр. з травня по жовтень проводили експедиційні обстеження (*in situ* дослідження) всієї території НПП «Гуцульщина» з метою виявлення природних місцезростань *H. coralloides*. Оскільки гриб росте на мертвій деревині бука лісового, яку легко ідентифікувати з року в рік, то одним локалітетом вважали одну колоду/ один стовбур (сухостій)/ один пень бука лісового, уражену/ураженого грибом та для зручності нумерували їх в межах кожної із географічно віддалених локацій у хронологічному порядку.

У дослідженнях із відтворення виду в природних умовах (*re-situ* дослідження) використаний аборигенний штам *H. coralloides*. Штам переданий нам із Колекції культур шапинкових грибів ІВК Інституту ботаніки ім. М.Г. Холодного Національної Академії Наук України, що є Національним надбанням України і внесена до переліку World Federation for Culture Collections (WFCC), реєстраційний номер 1152 [27].

Деталі експерименту – закладка мікологічних відтворювальних ділянок описані в роботі Петричук та ін. [13]. Умови ділянок відповідали умовам природним місцям зростання гриба. Попередні результати моніторингу щодо оцінки ефективності застосування технології *re-situ* із використанням різних рослинних субстратів, оброслих міцелієм гриба для інокуляції, та результативність приживлюваності на субстратах (колодах бука лісового) залежно від стадії розкладу цих субстратів і їх заселеності іншими видами дереворуйнівних грибів представлені також у роботі Петричук та ін. [13].

В рамках даного дослідження обстеження мікологічних відтворювальних ділянок (*re-situ* ділянок) проводили упродовж 2014 – 2017 рр. два рази у місяць, з 2018 по 2025 р. – у вересні – жовтні у відповідних локаціях: 1) хребет Каменистий; 2) гора Баба-Жбир; 3) у підніжжі гори Михалкова.

Результати моніторингу представлені по кожній ділянці окремо із зазначенням кількості колод, на яких плодоносив *H. coralloides* та кількості виявлених плодових тіл гриба на колодах.

Аналізуючи результати відтворення гриба у природі (*re-situ* результати) на трьох мікологічних відтворювальних ділянок встановлено, що плодоношення *H. coralloides* почалося тільки на третій рік реалізації технології *re-situ* і тільки на двох локаціях – в межах хребта Каменистий і гори Баба-Жбир. У перший рік плодоношення плодові тіла утворювалися тільки в зоні інокуляції колоди, не поширюючись на прилеглі ділянки і тільки на колодах, що перебували на першій стадії розкладу. У локації «хребет Каменистий» факт плодоношення зафіксовано на двох колодах, які були відібрані в експеримент, а на ділянці «гора Баба-Жбир» – на одній колоді. На обох локаціях плодоношення відбувалось тільки за умови, що субстратом для посівного міцелію слугувала букова тирса.

Обстеження цих ділянок в наступні роки (після 2016 р.) показали, що факт плодоношення *H. coralloides* має місце тільки на хребті Каменистий і тільки на одній колоді бука лісового (табл. 1). яку за весь час експерименту не заселили інші види дереворуйнівних грибів і яка була відібрана в експеримент на 1-ій стадії розкладу субстрату.

За 12 років колода (2013 – 2025 рр.) струхлявіла до такого стану, що деревину можна розламати руками і, крім цього, кількість деревини, яка залишилася, виглядає критично малою – щонайбільше залишилася маса 8-15 см в діаметрі, яка виступає над поверхнею землі. Відзначимо, що для експерименту відбирали колоди довжиною під 2 м і більше, а діаметром 30 – 41 см. Припускаємо, що плодоношення *H. coralloides* в цьому *re situ* локалітеті в силу вичерпування природного субстрату добігає кінця.

Слід відмітити, що поблизу цього місця тривалий час ми не реєстрували нових локалітетів *H. coralloides*. Найближчий природний локалітет, виявлений вперше у 2023 році, реєструється трохи нижче, за 50 м від цієї локації, і у 2024 році в цьому локалітеті виявлене масове плодоношення *H. coralloides* (природний локалітет № 14, колода № 10 у табл. 2).

Можемо припустити, що поширення гриба у локалітет № 14 (природний локалітет, колода № 10) відбулося саме із локалітета № 1, відтвореного методом *re-situ* (табл. № 3). Однак остаточно довести цей факт можуть тільки експерименти схрещування у популяційних дослідженнях [28 – 31]. У мікологічних дослідженнях аналізують розміщення плодових тіл *Armillaria* (Fr.) Staude, *Marasmius* Fr. чи *Tricholoma* (Fr.) Staude та *Pleurotus* (Fr.) P. Kumm., *Flammulina* P. Karst, *Oudemansiella* Speg. і доводять, що вони – частини одного клонального міцелію (який може охоплювати гектари і жити тисячі років) [32].

В інших *re-situ* локаціях плодоношення *H. coralloides* більше не реєстрували. Натомість відібрані в експеримент колоди заселяли плодові тіла дереворуйнівних грибів, зокрема *Schizophyllum commune* Fr. та інші широко розповсюджені види. Отримані результати свідчать про те, що відтворення *H. coralloides*, у природі можливе, однак його важко стандартизувати і контролювати.

За результатами моніторингових досліджень (*in situ*) встановлено, що на території НПП «Гуцульщина» *H. coralloides* приурочений до букових та ялицево-букових старих лісів, де є достатньо мертвої деревини. Плодові тіла трапляються групами з 2–5 і більше (максимальна кількість – 21) переважно на мертвій деревині бука лісового – на колодах, пнях, повалених стовбурах, сухостійних деревах (рис. 1).

Плодоносить гриб у вересні – жовтні, один-єдиний раз (у 2014 р.) початок плодоношення був зафіксований нами на початку травня на гниючій колоді бука лісового.

Обстеження природних місцезростань дозволило зафіксувати *H. coralloides* у 43 різних локаціях, де гриб плодоносить з різною періодичністю (табл. 2, рис. 2).

Примітки: а) кількість локалітетів, в межах яких фіксували факт плодоношення *Hericium coralloides* упродовж одного календарного року;

Таблиця 1

Результати моніторингу мікологічних відтворювальних ділянок *Hericium coralloides*

№	Локація/ Локалітет	Дата знахідки	Кількість екземплярів плодових тіл	Спостерігач(і)
1	Хр. Каменистий	02.10.2016	колода № 1 – 1 плодове тіло колода № 2– 1 плодове тіло	Петричук Ю.В., Пасайлюк М.В.
		05.09.2017	колода № 1 – 1 плодове тіло.	Петричук Ю.В. Пасайлюк М.В.
		10.10.2018	колода № 1 – 9 плодових тіл	Пасайлюк М.В.
		11.09. 2024	колода № 1 – 3 плодові тіла	Держипільський Л.М.
2	Підніжжя гори Михалкова	-	-	Петричук Ю.В., Пасайлюк М.В.
3	Гора Баба-Жбир	16.10.2016	1 колода, 1 плодове тіло	Петричук Ю.В.
		06.10.2017	1 колода, 1 плодове тіло	Петричук Ю.В.



Рис. 1. Плодові тіла Hericium coralloides на природних субстратах

b) загальна кількість плодоношень *Hericium coralloides* в локалітетах упродовж одного календарного року (з фіксацією фактів повторного плодоношення упродовж одного і того ж року);

c) кількість плодових тіл, яку фіксували *Hericium coralloides* упродовж одного календарного року на всіх локалітетах.

Отже, за роки спостережень науковцям вдалося ідентифікувати 43 природні місцезростання *H. coralloides* на території НПП «Гуцульщина». Відмітимо, що плодоношення виду на одній достатньо великій колоді бука лісового можливе впродовж тривалого часу за умови, що мертва деревина має 1 – 3 стадії розкладу, на 4 стадії розкладу плодоношення ще має місце, однак ресурси субстрату вичерпуються. Так, наприклад, на колодах № 1 та № 2, хр. Каменистий ми спостерігали плодові тіла *H. coralloides* від 9 до 12 років (табл. 2). Хоча в деякі роки можливе завмирання грибниці у зв'язку із несприятливими кліматичними умовами. Так, у 2011-2012 та 2014-2016 рр. середньорічна сума опадів була нижча норми для дослідженого регіону (менше 600 мм опадів), реєстрували зниження кількості опадів у серпні – жовтні та вищі норми температури повітря в цей період [33 – 37].

Найбільше число місцезростань *H. coralloides* відмічено у 2019 – 2024 рр., від 5 до 9, а максимум у 2022 р. та 2024 р. (табл. 2, рис. 2). Максимальна кількість плодових тіл *H. coralloides* зареєстрована нами у 2020 році – 59 плодових тіл.

За нашими спостереженнями, велика кількість плодових тіл *H. coralloides* в межах одного суб-

Таблиця 2

Результати моніторингу природних місцезростань *Hericium coralloides*

№ п/п	Локація/локалітет	Дата знахідки	Кількість плодових тіл	Спостерігач(і)
1.	Хр. Каменистий, колода № 1	09. 2005	10 екз.	Держипільський Л.М. Базюк І.В.
		09. 2009 16.09.2010 09.2011	3 екз. 5 екз. 2 екз.	Держипільський Л.М. Держипільський Л.М. Держипільський Л.М.
		05.09.2012 11.09.2013	3 екз. 1 екз.	Держипільський Л.М. Фокшей С.І.
		09.2013	1 екз	Петричук Ю.В. (джерело штаму 2332)
2.	Хр. Каменистий, сухостій № 1	02.11.2010	1 екз.	Фокшей С.І.
3.	Хр. Каменистий, колода № 2	19.11.2013 09.2014 15.07.2015 01.10.2015 08.2016 02.08.2017 02.09.2019 01.10.2019 24.09.2020 19.11.2020 15.09.2021 23.10.2021 05.10.2022 06.10.2023 17.10.2024	9 екз. 2 екз. 2 екз. 3 екз. 1 екз. 14 екз. 12 екз 7 екз. 21 екз. 15 екз. 12 екз. 3 екз. 1 екз. 1 екз. 3 екз.	Держипільський Л.М. Фокшей С.І.
4.	Хр. Каменистий, неподалік від ППП № 8 колода № 3	27.09.2018 10.10.2018	1 екз. 11 екз.	Погрібний О.О. Фокшей С.І.
5.	Хр. Каменистий (на хребті), колода № 4	30.09.2019	1 екз.	Фокшей С.І. Держипільський Л.М.
6.	Хр. Каменистий (на хребті), колода № 5	24.09.2020	1 екз.	Фокшей С.І. Держипільський Л.М.
7.	Хр. Каменистий, сухостій № 2	19.11.2020 15.09.2021 23.10.2021 05.10.2022 19.09.2023 17.10.2024	9 екз. 12 екз. 5 екз. 3 екз. 2 екз. 2 екз.	Фокшей С.І.
8.	Хр. Каменистий, пеньок № 1	19.11.2020 05.10.2022	3 екз. 5 екз.	Держипільський Л.М. Фокшей С.І.
9.	Хр. Каменистий, пеньок № 2	19.11.2020	8 екз.	Держипільський Л.М. Фокшей С.І.
10.	Хр. Каменистий (на хребті), колода № 6	19.11.2020	1 екз.	Держипільський Л.М. Фокшей С.І.
11.	Хр. Каменистий, ППП* № 8, колода № 7	15.09.2021	1 екз.	Фокшей С.І.
12.	Хр. Каменистий, ППП № 8, колода № 8	15.09.2021	1 екз.	Фокшей С.І.
13.	Хр. Каменистий, по стежці, колода № 9	28.10.2022 06.10.2023 17.10.2024	10 екз. 3 екз. 3 екз.	Фокшей С.І.
14.	Хр. Каменистий, колода № 10 (за 50 м від колоди № 1 з мікологічної відтворювальної ділянки № 1, табл. 1)	11.10.2023 17.10.2024	2 екз. 10 екз.	Держипільський Л.М.
15.	Хр. Каменистий, вище бази відпочинку «Байка», колода № 11	19.09.2023	1 екз	Фокшей С.І.
16.	Хр. Каменистий, по стежці на ППП № 8, колода № 12	17.10.2024	1 екз.	Фокшей С.І.

№ п/п	Локація/локалітет	Дата знахідки	Кількість плодових тіл	Спостерігач(і)
17.	Старокутське ПНДВ, окол. с. Город, колода № 1	7.10.2014	2 екз	Петричук Ю.В.,
18.	Косівське ПНДВ, окол. м. Косів, колода № 1	7.05.2014 7.10.2014	1 екз. 1 екз	Петричук Ю.В., Пасайлюк М.В.
19.	Косівське ПНДВ**, ППП № 9, Сопка, колода № 2	29.09.2019	1 екз.	Фокшей С.І.
20.	Косівське ПНДВ, ППП № 9 Сопка, на корені враженого бука,	7.10.2024	1 екз	Фокшей С.І.
21.	Гора Михалкова, пот. Кременица сухостій № 1	25.10.2010 13.10.2011	2 екз. 2 екз.	Держипільський Л.М. Фокшей С.І.
22.	Маршрут Кляуза-Лисина Космацька Колода № 1	01.09.2013	1 екз	Акулов О.Ю., Держипільський Л.М.
23.	Хр. Сокільський, колода№ 1	20.11.2013	1 екз.	Фокшей С.І. Держипільський Л.М.
24.	Хр. Сокільський, колода№ 2	20.11.2013	6 екз.	Фокшей С.І. Держипільський Л.М.
25.	Хр. Сокільський, колода№ 3	20.11.2013	1 екз.	Фокшей С.І. Держипільський Л.М.
26.	Хр. Сокільський, колода№ 4	10.2014 02.07.2018	1 екз. 1 екз.	Фокшей С.І.
27.	Хр. Керничний, колода№ 1	14.11.2013	1 екз.	Фокшей С.І. Держипільський Л.М.
28.	Хр. Керничний, колода№ 2	10.10.2019	9 екз.	Фокшей С.І.
29.	Косівське л-во, ДП "Кутське лісове господарство", околиці с. Хімчин, колода № 1	01.10.2015	2 екз	Фокшей С.І., Гостюк З.В.
30.	Ур. Хоминський, біля ППП № 2, колода № 1	28.09.2018 10.10.2019	6 екз. 13 екз.	Фокшей С.І.
31.	Ур. Хоминський, біля ППП № 2, колода № 2	27.10.2022 29.08.2023 10.09.2024	4 екз. 2 екз. 3 екз.	Фокшей С.І.
32.	Ур. Хоминський, біля ППП № 2, колода № 3	27.10.2022	20 екз.	Фокшей С.І.
33.	Ур. Хоминський, біля ППП № 2, колода№ 4	27.10.2022	3 екз.	Фокшей С.І.
34.	Ур. Хоминський, біля ППП № 2, колода № 5	27.10.2022	9 екз.	Фокшей С.І.
35.	Хр. Голиця (на хребті), колода № 1	02.10.2018	1 екз.	Держипільський Л.М. Фокшей С.І.
36.	Хр. Голиця (ур. Дзіндзюричка), колода№ 2 на стежці	04.08.2017 03-08.10.2019	3 екз. 3 екз.	Держипільський Л.М. Фокшей С.І.
37.	Хр. Голиця (ур. Дзіндзюричка), колода № 3	04.10.2021	5 екз.	Фокшей С.І.
38.	Ур. Баранівка, пеньок № 1	20.10.2020	1 екз.	Фокшей С.І.
39.	Шешорське ПНДВ, хр. Брусний, колода № 1	09.2013.	1 екз.	Петричук Ю.В. (джерело штаму 2333)
40.	Шешорське ПНДВ, ППП № 11, колода № 2	28.10.2022 06.10.2023 21.10.2024	2 екз. 1 екз. 5 екз.	Фокшей С.І.
41.	Шешорське ПНДВ, Ур. Лебедин, колода № 3	22.09.2023	2 екз.	Фокшей С.І.
42.	Ур. Каменець, Колода № 1 біля стежки	23.10.2024	1 екз.	Фокшей С.І.
43.	Ур. Каменець, Колода № 2 вище ППП № 15	20.10. 2025	1 екз.	Погрібний О.О.

* Примітка: ППП – Постійна пробна площа. ** ПНДВ – Природоохоронне науково-дослідне відділення

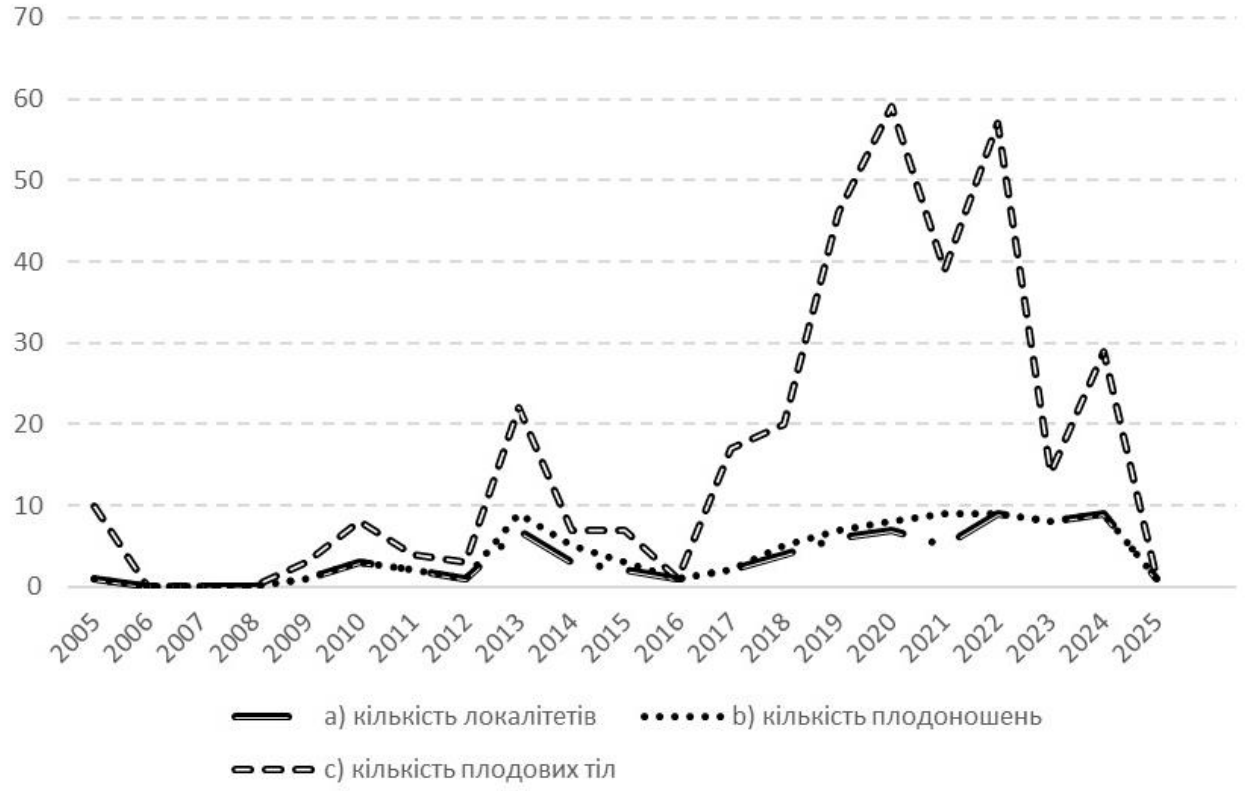


Рис. 2. Періодичність плодоношень Hericium coralloides у локалітетах

страту з'являється за умови, що субстрат перебуває на третій стадії розкладу. На першій-другій стадії розкладу ми реєстрували одночасно 1- 3 плодові тіла гриба, в умовах четвертої стадії розкладу деревини, коли запаси субстрату суттєво вичерпані, могли фіксувати 1-3 плодові тіла або ж взагалі їх відсутність.

Відмітимо, що плодоношення виду не є щорічним у кожній із локацій. Такі біологічні особливості, очевидно, є однією із причин низької чисельності гриба – відсутність плодових тіл знижує імовірність розповсюдження виду, а висока фрагментованість ареалу існування ставить додаткові виклики у цьому питанні. Також причиною можуть бути кліматичні умови: високі температури разом із низькою кількістю опадів не сприяють плодоношенню грибів, а для *H. coralloides* потреба у вологості величезна – щонайменший показник становить 40-50 % вологості субстрату при вирощуванні в лабораторних умовах та 85-95 % вологості повітря, особливо для формування спор [38]. Також відомо, що оптимальна температура плодоношення *H. coralloides* 15-20º С. При температурі вище 25°С утворення плодових тіл значно сповільнюється. І в цей же час, наприклад, у місяці, типові для плодоношення виду, в останні роки відмічено підвищення середньодобової температури (серпень-вересень), періоди посухи у вересні – жовтні та температурні гойдалки загалом [33 – 37].

Разом з тим, знахідки нових локалітетів природних місцезростань у 2020 – 2024 рр. у місцях, віддалених від раніше відомих, щонайменше, на 3-5 км, можуть свідчити про позитивну, хоч і повільну тенденцію поширення виду територією парку. Відомо, що для *H. coralloides* характерна низька схожість базидіоспор (не більше 1% в лабораторних умовах) та відносно невисока здатність до саморозповсюдження (більшість спор поширюються на відстань 1 м від плодового тіла гриба і тільки невелика частка на відстань 100 м, а зовсім мало на відстань 1000 м) [39]. Тому фрагментованість території НПП «Гуцульщина» а ще віддаленість ділянок із відповідними умовами для росту гриба становлять суттєві виклики перед видом у плані розповсюдження. Як наслідок, активні дії з метою відтворення виду є цілком виправданими.

Головні висновки. На території НПП «Гуцульщина» виявлено 43 природні місцезростання *H. coralloides,* нерівномірно віддалені одні від одних і плодоношення яких має несистемний характер, що ускладнює моніторинг виду та прогноз його збереження в рамках відомих локалітетів. Територія парку кластерна, фрагментована, тому знахідки нових локалітетів природних місцезростань у 2019 – 2024 рр. у місцях, віддалених від раніше відомих щонайменше на 3-5 км, можуть свідчити про позитивну, хоч і повільну тенденцію поширення виду територією парку.

Висока імовірність негативного впливу зміни клімату: підвищення температури, зниження вологості – знижують імовірність плодоношення виду.

Результати моніторингу на мікологічних відтворювальних ділянках свідчать про те, що застосування методики *re situ* є успішним і можливим. Тривалий позитивний результат мав місце на хр. Каменистий, де спостерігали плодоношення *H. coralloides* у 2017, 2018, і 2024 рр. однак цей позитивний результат стосувався тільки однієї колоди бука лісового, яку за весь час експерименту не заселили інші види дереворуйнівних грибів. За 12 років ця колода струхлявіла до такого стану, що деревину можна розламати руками і, крім цього, кількість деревини, яка залишилася, виглядає критично малою – щонайбільше залишилася маса 8-15 см в діаметрі, яка виступає над поверхнею землі. Припускаємо, що плодоношення *H. coralloides* в цьому *re situ* локалітеті в силу вичерпування природного субстрату добігає кінця.

У 2023 році вперше виявлений природний локалітет *H. coralloides*, який реєструється за 50 м від колоди № 1 із *re situ* локації. У 2024 році в цьому природному локалітеті реєстрували масове плодоношення *H. coralloides.* Ми припускаємо, що поширення гриба відбулося саме із локалітета, відтвореного методом *re-situ*. Однак це твердження потребує перевірки після удосконалення молекулярних методів досліджень для виявлення батьківської спорідненості у грибів – ксилотрофів.

Література

1. Шеляг-Сосонко Ю. Р., Вассер С. П., Дудка І. О. *Hericium coralloides*. *Червона книга України. Рослинний світ* / відп. ред. Ю. Р. Шеляг-Сосонко. Київ, Українська енциклопедія, 1996. С. 638.
2. Придюк М. П., Гелюта В. П. *Hericium coralloides*. *Червона книга України. Рослинний світ* / ред. Я. П. Дідух. Київ, Глобалконсалтинг, 2009. С. 813.
3. Перелік видів рослин та грибів, що заносяться до Червоної книги України (рослинний світ). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0370-21?lang=en#Text (дата звернення: 21.05.2026).
4. Pasailiuk M. V., Sukhomlyn M. M., Gryganskyi A. P. Patterns of *Hericium coralloides* growth with competitive fungi. *Czech Mycology*. 2019. Vol. 71, № 1. P. 49–63. DOI: 10.33585/cmy.71104
5. Юречко Р. Ю., Рало В. М., Лилик В. І., Сапожник В. А. Місцевиростання *Hericium coralloides* (Scop.) Pers. (Hericiaceae) у НПП ‘’Північне Поділля’’ (Львівська область, Україна). *Наукові основи збереження біотичної різноманітності.* 2019. Т. 10(17), № 1, С. 255–264.
6. Іжик Г. В. Гриби-деструктори мертвої деревини в букових пралісах. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2013. Вип. 23(11). С. 44–49.
7. Фокшей С. І., Держипільський Л. М. Рідкісні види макроміцетів з урочища Каменистий (Національний природний парк «Гуцульщина»). *Український ботанічний журнал*. 2019. Т. 76, № 4. С. 362–366.
8. Heleno S.A., Barros L., Martins A., João M., Queiroz R.P., Morales P., Fernández-Ruiz V., Ferreira I.C.F.R. Chemical composition, antioxidant activity and bioaccessibility studies in phenolic extracts of two *Hericium* wild edible species. *LWT – Food Science and Technology*. 2015. Vol. 63, № 1. P. 475–481.
9. Lazur J., Kała K., Krakowska A., Sułkowska-Ziaja K., Szewczyk A., Piotrowska J., Rospond B., Fidurski M., Marzec K., Muszyńska B. Analysis of bioactive substances and essential elements of mycelia and fruiting bodies of Hericium spp. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2024. Vol. 127. Art. 105981. DOI: 10.1016/j.jfca.2024.105981.
10. Williams L.M., Berthon B.S., Stoodley I.L., Williams E.J.; Wood L.G. Medicinal Mushroom Extracts from *Hericium coralloides* and *Trametes versicolor* Exert Differential Immunomodulatory Effects on Immune Cells from Older Adults In Vitro. *Nutrients*. 2023. Vol. 15, № 9. Art. 2227. DOI: 10.3390/nu15092227
11. Wittstein K., Rascher M., Rupcic Z. Löwen E., Winter B., Köster R.W., Stadler M. Corallocins A-C, nerve growth and brain-derived neurotrophic factor inducing metabolites from the mushroom Hericium coralloides. *Journal of Natural Products*. 2016. Vol. 79, № 9. P. 2264–2269. DOI: 10.1021/acs.jnatprod.6b00371.
12. Пророчук В. В., Фокшей С. І. Стратегія охорони макроміцетів у національному природному парку «Гуцульщина». *Науковий вісник НЛТУ України*. 2013. Вип. 23(11). С. 151–155.
13. Петричук Ю. В., Пасайлюк М. В., Сухомлин М. М. Аспекти відтворення *Hericium coralloides* (Scop.) Pers. методом re-situ на території Національного природного парку «Гуцульщина». *Біоресурси і природокористування*. 2017. Т. 9. № 1. С. 5–13.
14. Маланюк В. Б. Нові місцезнаходження занесених до «Червоної книги України» макроміцетів у Галицькому Національному природному парку. *Український ботанічний журнал.* 2013. Т. 70. № 2. С. 251–255.
15. Маланюк В. Б., Заморока А. М., Леонтьєв Д. В., Дудка І. О. Знахідки грибів Червоної книги України на території Галицького НПП. *Знахідки рослин і грибів Червоної книги та Бернської конвенції (Резолюція 6). Т. 1 (Серія: “Conservation Biology in Ukraine”. Вип. 11)* / ред. А. А. Куземко. Київ-Чернівці, Друк Арт, 2019. С. 287–289.
16. Фіторізноманіття заповідників і національних природних парків України. Ч. 1. Біосферні заповідники. Природні заповідники / Андрієнко Т. Л. та ін. ; відп. ред. В. А. Онищенко, Т. Л. Андрієнко. Київ : Фітосоціоцентр, 2012. 406 с.
17. Величезну колонію рідкісного і екзотичного гриба знайшли у Києві. *Хроніки Обухова* : веб-сайт. 2024. URL: https://obukhiv.info/news/velicheznu-koloniiu-ridkisnogo-i-ekzotichnogo-griba-znaishli-u-kievi/ (дата звернення: 12.12.2025).
18. Гриби заповідників та національних природних парків Лівобережної України. Т. І / Дудка І. О. та ін. Київ : Арістей, 2009. 306 с.
19. Гриби заповідників і національних природних парків Українських Карпат / Дудка І. О. та ін. ; ред. В. П. Гелюта. Київ : Проект «Наукова книга», 2019. 215 с.

20. Shevchenko M. V., Heluta V. P., Zykova M. O., Hayova V. P. Current distribution data for the red-listed species of aphyllophoroid fungi in Ukraine. *Ukrainian Botanical Journal* 2021. Vol. 78, № 1. P. 47–61. DOI: 10.15407/ ukrbotj78.01.047
21. Crockatt M. Ecology of the rare oak polypore *Piptoporus auercinus* and the tooth fungi *Hericium cirrhatum*, *H. coralloides*, and *H. erinaceus* in the UK : Dr. Sci. Diss. (Doctor of Philosophy) / Cardiff University, ProQuest LLC. 2008. 128 p.
22. Wainhouse M., Boddy L. Making hollow trees: Inoculating living trees with wood-decay fungi for the conservation of threatened taxa – A guide for conservationists. *Global Ecology and Conservation*. 2021. Vol. 33, № 11. e01967. DOI: 10.1016/j.gecco.2021. e01967.
23. Choi K.D., Lee K.T., Shim J.O., Lee Y.S., Lee T.S., Lee S.S., Guo S.X., Lee M.W. A new method for cultivation of sclerotium of *Grifola umbellata*. *Mycobiology*. 2003. Vol. 31, № 2. P. 105–112.
24. Piętka J., Grzywacz A. In situ inoculation of larch with the threatened wood-decay fungus *Fomitopsis officinalis* (Basidiomycota): experimental studies. *Polish Botanical Journal*. 2005. Vol. 50, № 2. P. 225–231.
25. Takaki K., Yoshida K., Saito T., Kusaka T., Yamaguchi R., Takahashi K., Sakamoto Y. Effect of Electrical Stimulation on Fruit Body Formation in Cultivating Mushrooms. *Microorganisms*. 2014. Vol. 12;2, № 1. P. 58–72. DOI: 10.3390/microorganisms2010058.
26. Islam F., Ohga S. The Response of Fruit Body Formation on *Tricholoma matsutake*. In Situ Condition by Applying Electric Pulse Stimulator. *Agronomy.* 2012. P. 1–7. DOI: 10.5402/2012/462724
27. Колекція культур шапинкових грибів (ІВК) / Бісько Н. А. та ін. Київ : Інститут ботаніки імені М. Г. Холодного НАН України ; Альтерпрес, 2016. 120 с.
28. Сухомлин М. М. Генотипічна варіація і клональна структура популяції *Flammulina velutipes* (Curt.:Fr.) Sing. *Науковий вісник Волинського державного університету ім. Л. Українки. Біологічні науки*. 2000. № 7. С. 158–164.
29. Сухомлин М. М. Використання алельної конституції дереворуйнівних гіменоміцетів для вивчення їх популяційної структури. *Вісник Донецького університету. Серія А. Природничі науки*. 2000. № 1. С. 151–154.
30. Сухомлин М. М. Проблеми сумісності у вищих базидіоміцетів (фізіологічні, екологічні, морфологічні аспекти) : дис. … д-ра біол. наук : 03.00.21 / Донецький національний ун-т. Київ, 2003. 418 с.
31. Sukhomlyn M. M. Distribution and infection biology of *Flammulina velutipes* (Cur.Fr.) Sing. *J. Forest Science*. 2001. Vol. 47, № 2. P. 161–170.
32. Smith M.L., Bruhn J.N., Anderson J.B. The fungus Armillaria bulbosa is among the largest and oldest living organisms. *Nature*. 1992. Vol. 356(6368). P. 428–431. DOI: 10.1038/356428a0.
33. Фокшей С. І. Клімат НПП «Гуцульщина». *Літопис природи НПП «Гуцульщина»*. Т. 9 / відпов. ред. Ю. П. Стефурак. Косів, 2012. С. 21–50.
34. Фокшей С. І. Клімат НПП «Гуцульщина». *Літопис природи НПП «Гуцульщина»*. Т. 10 / відпов. ред. Ю. П. Стефурак. Косів, 2013. С. 40–69.
35. Фокшей С. І. Клімат НПП «Гуцульщина». *Літопис природи НПП «Гуцульщина»*. Т. 12 / відпов. ред. Ю. П. Стефурак. Косів, 2015. С. 22–45.
36. Фокшей С. І. Клімат НПП «Гуцульщина». *Літопис природи НПП «Гуцульщина»*. Т. 13 / відпов. ред. Ю. П. Стефурак. Косів, 2016. С. 63–86.
37. Фокшей С. І. Клімат НПП «Гуцульщина». *Літопис природи НПП «Гуцульщина»*. Т. 14 / відпов. ред. Ю. П. Стефурак. Косів, 2017. С. 13–36.
38. Пасайлюк М. В., Сухомлин М. М. Вирощування *Hericium coralloides*. *Біологічні системи*. 2024. Т. 16, № 2. С. 194–196.
39. The Global Fungal Red List Initiative. Hericium coralloides (Scop.) Pers. / Asef M. R. et al. 2014. URL: https://redlist.info/iucn/ species_view/120231 (дата звернення: 15.10.2025).

Дата першого надходження статті до видання: 17.07.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

УДК 502.4:712.25:574.2
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.44

ЕКОЛОГО-ПРОСВІТНИЦЬКА СТЕЖКА ЯК ІНСТРУМЕНТ ЕКОЛОГІЧНОЇ ОСВІТИ ТА ЗБЕРЕЖЕННЯ БІОРІЗНОМАНІТТЯ ПАРКУ-ПАМ'ЯТКИ САДОВО-ПАРКОВОГО МИСТЕЦТВА ЗАГАЛЬНОДЕРЖАВНОГО ЗНАЧЕННЯ «МЕЖИГІР'Я»

Сербенюк Г.А.[1,2] (orcid.org/0000-0001-9187-0623)
Паламарчук С.П.[1,2] (orcid.org/0000-0002-9083-6850)
[1]Національний університет біоресурсів і природокористування України
вул. Героїв Оборони, 13, 03041, Київ
[2]Парк-памятка СПМ загальнодержавного значення Межигіря
вул. І. Франка, 19, 07354, с. Нові Петрівці
svitpalamar@gmail.com; bojruw@ukr.net

Стаття присвячена комплексному дослідженню ролі еколого-просвітницької стежки як ефективного інструменту екологічної освіти та культури, збереження біорізноманіття на території парку-пам'ятки садово-паркового мистецтва загальнодержавного значення «Межигір'я». Актуальність цієї наукової проблеми зумовлена необхідністю зниження антропогенного тиску на заповідні об'єкти та потребою формування екологічної культури сучасного суспільства. У роботі детально аналізується стан природних комплексів парку, які інтегровані в регіональну екомережу та ідентифіковано ключові локації з високим рівнем видового різноманіття місцевої флори і фауни, зокрема рідкісних та червонокнижних видів. Науково обґрунтовано методичні підходи до проектування оптимального екологічного маршруту, який вдало поєднує ландшафтну привабливість із безпекою для вразливих екосистем. Визначено та охарактеризовано основні тематичні зупинки маршруту, орієнтовані на дослідження нагірних дібров, гідрологічних об'єктів та проведення занять з біоіндикації для студентів і відвідувачів парку. Особливу увагу приділено функціональному зонуванню території вздовж стежки, що дозволяє ефективно регулювати екскурсійні потоки й виділяти спеціальні «зони тиші» для збереження автохтонних видів. Визначено роль ключових інфраструктурних об'єктів прибережної зони, зокрема локації «Корабель на Дніпрі» (дебаркадер «Галеон»), як базової орнітологічної та гідрологічної зупинки маршруту. Доведено, що створення такого маршруту успішно трансформує рекреаційний простір парку в інтерактивне освітнє середовище, що безпосередньо сприяє охороні природи та реалізації загальної стратегії сталого розвитку об'єкта природно-заповідного фонду. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання запропонованих рекомендацій для розвитку екотуризму в інших парках України. *Ключові слова:* еколого-просвітницька стежка, екологічна освіта, біорізноманіття, парк-пам'ятка «Межигір'я», природоохоронні заходи, сталий розвиток, заповідний фонд.

Environmental education trail as a tool for environmental education and biodiversity conservation at the «Mezhyhirya» park-monument of landscape art of National importance. Serbeniuk H., Palamarchuk S.

The article is devoted to a comprehensive study of the role of an ecological and educational trail as an effective tool for environmental education, culture, and biodiversity conservation in the "Mezhyhiria" Park-Monument of Garden and Park Art of National Importance. The relevance of this scientific problem is driven by the need to reduce anthropogenic pressure on protected areas and the demand for forming the environmental culture of modern society. The paper provides a detailed analysis of the state of the park's natural complexes, which are integrated into the regional ecological network, and identifies key locations with a high level of species diversity of local flora and fauna, including rare and red-listed species. Methodological approaches to designing an optimal ecological route that successfully combines landscape attractiveness with safety for vulnerable ecosystems are scientifically substantiated. The main thematic stops of the route aimed at researching upland oak forests, hydrological objects, and conducting bioindication classes for students and park visitors are identified and characterized. Particular attention is paid to the functional zoning of the territory along the trail, which allows for effective regulation of excursion flows and the allocation of special "zones of silence" for the conservation of autochthonous species. The role of key infrastructure objects in the coastal zone, particularly the location "Ship on the Dnipro" (the "Galleon" debarkader), as a fundamental ornithological and hydrological stop of the route is defined. It is proved that the creation of such a route successfully transforms the recreational space of the park into an interactive educational environment, which directly contributes to nature protection and the implementation of the overall sustainable development strategy of the protected area. The practical significance of the results obtained lies in the possibility of using the proposed recommendations for the development of ecotourism in other parks in Ukraine. *Key words:* ecological and educational trail, environmental education, biodiversity, "Mezhyhiria" Park-Monument, nature conservation measures, sustainable development, protected fund.

Актуальність дослідження. Екологічні стежки є одним із найбільш ефективних інструментів поєднання природоохоронної, еколого-освітньої, наукової та рекреаційної діяльності на територіях природно-заповідного фонду. Вони забезпечують безпосередній контакт відвідувачів із природними

© Сербенюк Г.А., Паламарчук С.П., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

екосистемами, сприяють формуванню екологічної культури, популяризації знань про біорізноманіття та принципи сталого природокористування, а також дозволяють регулювати рекреаційне навантаження шляхом організації впорядкованих маршрутів. Саме тому екологічні стежки розглядаються як один із ключових елементів сучасної системи екологічної освіти та природоохоронного менеджменту [1].

Історія створення екологічних стежок бере початок на початку XX століття у США, а вже у 1960-х роках вони набули поширення в країнах Балтії. В Україні розвиток екологічних стежок розпочався наприкінці 1980-х років і нині вони є невід'ємною складовою діяльності об'єктів природно-заповідного фонду. Значний внесок у розроблення теоретичних засад створення та функціонування екологічних стежок зробили Я. Т. Дідух, В. М. Єрмоленко, О. Т. Крижанівська, Л. М. Бабюк, С. Б. Шпуляр та інші вчені, які розглядали їх як ефективний засіб екологічної освіти, розвитку екологічного туризму, проведення наукових досліджень і збереження природної спадщини [2,3].

Сучасні підходи до функціонування територій природно-заповідного фонду передбачають гармонійне поєднання природоохоронної діяльності з екологічною просвітою та регульованою рекреацією. За таких умов екологічні стежки виконують не лише інформаційно-пізнавальну функцію, а й сприяють мінімізації негативного антропогенного впливу шляхом концентрації потоків відвідувачів на спеціально облаштованих маршрутах. Водночас вони створюють умови для проведення польових досліджень, моніторингу стану природних комплексів, екологічного виховання населення та практичної підготовки здобувачів вищої освіти.

Особливої актуальності набуває створення екологічних стежок у межах новостворених об'єктів природно-заповідного фонду України. Одним із таких об'єктів є парк-пам'ятка садово-паркового мистецтва загальнодержавного значення «Межигір'я», створений у 2023 році. Територія парку вирізняється високою ландшафтною різноманітністю, поєднанням природних і антропогенно трансформованих екосистем, значним флористичним і фауністичним різноманіттям, а також унікальним розташуванням у прибережній зоні Київського водосховища. Тут представлені лісові, лучні, прибережно-водні та водно-болотні комплекси, які мають важливе природоохоронне, наукове та рекреаційне значення [4].

Попри значний природний потенціал території, питання організації сучасної еколого-просвітницької інфраструктури, зокрема розроблення науково обґрунтованої екологічної стежки, залишається недостатньо висвітленим у науковій літературі. Особливої уваги потребує створення маршрутів, які б не лише знайомили відвідувачів із природною та історико-культурною спадщиною парку, а й демонстрували процеси антропогенної трансформації природних комплексів, наслідки створення Київського водосховища, сучасний стан прибережних екосистем та необхідність їх збереження.

У зв'язку з цим актуальним є розроблення еколого-просвітницької стежки «Корабель на Дніпрі: шляхами екологічних трансформацій», яка поєднує природоохоронний, освітній, науковий та рекреаційний компоненти. Запропонований маршрут проходить через найбільш репрезентативні природні та антропогенно змінені ділянки парку, дозволяє простежити особливості функціонування екосистем Київського водосховища, ознайомитися з процесами трансформації природного середовища та оцінити сучасний стан біорізноманіття території [5].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями.

Представлене дослідження безпосередньо пов'язане з реалізацією «Положення про рекреаційну діяльність у межах територій та об'єктів природно-заповідного фонду України», затвердженого Наказом Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 26.07.2022 № 256, що покликане забезпечити баланс між розвитком туризму та охороною природних ресурсів. Обґрунтування проектування та функціонування еколого-просвітницької стежки у парку «Межигір'я» виступає практичним інструментом виконання вимог чинного законодавства, оскільки пропонує конкретну модель для відвідувачів, яка локалізує рекреаційний тиск, інтегрує сучасні цифрові засоби екоосвіти та гарантує збереження унікального біорізноманіття заповідного об'єкта.

Методологічне або загальнонаукове значення.

У праці наведені результати досліджень на прикладі конкретної заповідної території – науково-методичне обґрунтування створення та функціонування еколого-просвітницької стежки у парку-пам'ятці садово-паркового мистецтва загальнодержавного значення «Межигір'я». Розроблена модель стежки слугує методологічним взірцем для проектування аналогічних маршрутів у паркових комплексах зі складною соціо-екологічною структурою.

Виклад основного матеріалу.

Парк-пам'ятка садово-паркового мистецтва загальнодержавного значення «Межигір'я» розташований у Вишгородському районі Київської області на правому березі Київського водосховища. Статус парку-пам'ятки садово-паркового мистецтва загальнодержавного значення території надано Законом України від 14 липня 2023 року № 3264-IX «Про оголошення природної території Межигір'я парком-пам'яткою садово-паркового мистецтва загальнодержавного значення «Межигір'я». Територія парку вирізняється поєднанням цінних природних комплексів, історико-культурної спадщини та сучасної рекреаційної інфраструктури, що визначає її високу природоохоронну, наукову та еколого-освітню цінність.

Маршрут еколого-просвітницької стежки «Корабель на Дніпрі: шляхами екологічних трансформацій» проходить територією, яка характеризується значною ландшафтною та екосистемною різноманітністю. Уздовж маршруту представлені природні й антропогенно трансформовані екосистеми, що відображають особливості функціонування прибережної частини Київського водосховища та паркових ландшафтів ППСПМЗДЗ «Межигір'я» [6].

Домінуючими є лісові екосистеми, сформовані переважно широколистяними насадженнями з участю дуба звичайного (*Quercus robur* L.), клена гостролистого (*Acer platanoides* L.), липи серцелистої (*Tilia cordata* Mill.) та інших деревних видів. Ці насадження виконують важливі кліматорегулюючі, ґрунтозахисні та середовищетвірні функції, забезпечують підтримання біорізноманіття та створюють сприятливий мікроклімат.

У прибережній частині маршруту поширені прибережно-водні та водно-болотні екосистеми, представлені акваторією Київського водосховища, затокою, очеретяними угрупованнями та прибережною рослинністю. Вони є оселищем численних видів риб, водоплавних птахів, земноводних і безхребетних, виконують водоохоронну функцію та відіграють важливу роль у підтриманні екологічної рівноваги.

Окремими ділянками представлені паркові екосистеми, сформовані внаслідок багаторічного ландшафтного благоустрою території. Вони поєднують декоративні деревно-чагарникові насадження, газони, відкриті простори та елементи рекреаційної інфраструктури, забезпечуючи комфортні умови для відвідування парку.

Поряд із природними комплексами вздовж маршруту трапляються антропогенно трансформовані екосистеми, до яких належать гідротехнічні споруди, пішохідні доріжки, дебаркадер СКРЦ «Галеон», оглядові майданчики та інші елементи рекреаційної інфраструктури. Їх поєднання з природними компонентами дозволяє наочно продемонструвати відвідувачам особливості взаємодії природних і антропогенних чинників у процесі формування сучасних ландшафтів Межигір'я.

За результатами маршрутних обстежень території, аналізу природних комплексів та рекреаційної інфраструктури ППСПМЗДЗ «Межигір'я» розроблено еколого-просвітницьку стежку «Корабель на Дніпрі: шляхами екологічних трансформацій» (рис. 1). Під час її проєктування враховано природоохоронну цінність окремих ділянок, еколого-освітній потенціал об'єктів, особливості рельєфу, існуючу мережу пішохідних доріжок, а також доступність маршруту для різних категорій відвідувачів.



Рис. 1. Еколого-просвітницька стежка «Корабель на Дніпрі:шляхами екологічних трансформацій»

Протяжність екологічної стежки становить близько 0,5 км, а середня тривалість проходження – 45 хвилин. За класифікаційними ознаками маршрут належить до пішохідних, лінійних та пізнавально-прогулянкових екологічних стежок. Відповідно до особливостей рельєфу, характеру покриття та фізичних навантажень його можна віднести до легкої категорії складності, оскільки він прокладений існуючими парковими доріжками зі зручним покриттям і не потребує спеціальної фізичної підготовки.

Профіль маршруту характеризується слабохвилястим рельєфом із незначними перепадами висот (до 10–12 м), що забезпечує комфортне пересування відвідувачів та відповідає вимогам до сучасних еколого-просвітницьких стежок. Найбільш рівнинні ділянки розташовані між першою та другою тематичними зупинками, тоді як у центральній частині спостерігається незначне підвищення рельєфу, яке створює сприятливі умови для облаштування оглядових точок та проведення польових спостережень. Завершальна ділянка маршруту поступово знижується у напрямку затоки та прибережної смуги Київського водосховища, забезпечуючи безпечний доступ до основних природних об'єктів.

Помірний рельєф, оптимальна довжина та відсутність складних для проходження ділянок сприяють використанню стежки для екологічних екскурсій, навчальних практик здобувачів вищої освіти, польових досліджень, моніторингових спостережень і проведення еколого-просвітницьких заходів. Використання існуючої мережі пішохідних доріжок мінімізує ризик порушення ґрунтового покриву та деградації природних екосистем, що повністю відповідає принципам сталого природокористування.

Уздовж маршруту виділено шість тематичних зупинок, кожна з яких висвітлює окремі аспекти функціонування природних і антропогенно трансформованих екосистем, історію формування території, особливості біорізноманіття та сучасні екологічні проблеми прибережної зони Київського водосховища. Послідовність їх розташування забезпечує логічне сприйняття інформації та дозволяє комплексно ознайомити відвідувачів із природною та історико-культурною спадщиною ППСПМЗДЗ «Межигір'я».

Перша тематична зупинка розташована на початку маршруту та виконує вступну еколого-інформаційну функцію. Вона знайомить відвідувачів з історією створення Парку-пам'ятки садово-паркового мистецтва загальнодержавного значення «Межигір'я», його природоохоронним статусом, сучасними напрямами діяльності та значенням у системі природно-заповідного фонду України. Під час екскурсії висвітлюються особливості географічного розташування території, формування її сучасної ландшафтної структури, природні та історико-культурні передумови створення парку. Зупинка формує у відвідувачів цілісне уявлення про природоохоронну цінність території та визначає основну концепцію екологічної стежки.

Друга тематична зупинка присвячена греблі, яка відокремлює затоку від основної акваторії Київського водосховища. Ця ділянка є показовим прикладом впливу гідротехнічного будівництва на природні екосистеми долини Дніпра. Під час огляду розглядаються процеси зміни гідрологічного режиму після створення Київського водосховища, трансформація заплавних ландшафтів, особливості формування сучасних прибережно-водних екосистем та їх роль у підтриманні екологічної рівноваги. Значна увага приділяється сучасним екологічним проблемам водосховища, питанням охорони водних ресурсів та збереження прибережних біотопів.

Третя тематична зупинка розташована біля голубника і присвячена орнітофауні території парку. Тут відвідувачі мають можливість спостерігати за різними групами птахів, ознайомитися з їх видовим різноманіттям, екологічними особливостями та роллю у функціонуванні природних екосистем. Особлива увага приділяється водоплавним, навколоводним та синантропним видам, які є невід'ємною складовою біорізноманіття прибережної зони Київського водосховища. Під час екскурсії розглядаються питання сезонних міграцій птахів, їх значення як біоіндикаторів стану довкілля та необхідність охорони місць гніздування й відпочинку орнітофауни.

Четверта тематична зупинка знаходиться в межах затоки Київського водосховища біля дебаркадера СКРЦ «Галеон». Ця ділянка демонструє приклад поєднання природних комплексів із сучасною рекреаційною інфраструктурою та дозволяє оцінити особливості взаємодії природних і антропогенних компонентів ландшафту. Зупинка дає можливість простежити процеси формування водних екосистем затоки, оцінити їх екологічний стан та значення для підтримання біорізноманіття. Глибина затоки, яка сягає близько 15 м, створює специфічні умови для існування різноманітних гідробіонтів і риб, а також впливає на формування мікроклімату прибережної території.

П'ята тематична зупинка присвячена флорі та фауні Київського водосховища. Вона знайомить відвідувачів із видовим різноманіттям прибережної та водної рослинності, особливостями функціонування прибережно-водних екосистем, іхтіофауною, земноводними, безхребетними та іншими представниками тваринного світу. Окремо розглядаються рідкісні та охоронювані види, характерні для даної території, а також екосистемні послуги, які забезпечують прибережні біотопи, зокрема очищення води, підтримання гідрологічного режиму, збереження біорізноманіття та стабілізацію берегових процесів.

Шоста тематична зупинка завершує маршрут і є оглядовим майданчиком, з якого відкривається панорама Київського водосховища та прилеглих природних комплексів. Саме на цій ділянці узагаль-

Таблиця 1

Характеристика зупинок еколого-просвітницької стежки «Корабель на Дніпрі: шляхами екологічних трансформацій»

№ зупинки	Назва зупинки	Основні об'єкти спостереження	Екологічне значення	Освітнє значення
1	Стежка до корабля на водах Дніпра	Прибережні ландшафти, огляд території парку	Ознайомлення з природними умовами та особливостями розташування території	Формування уявлення про природоохо-ронну цінність ППСПМЗДЗ «Межигір'я»
2	Гребля	Гідротехнічна споруда, каскад водойм, прибережні екосистеми	Демонстрація антропогенної трансформації природних заплав Дніпра та змін гідрологічного режиму	Вивчення впливу людини на водні екосистеми та ландшафти
3	Корабель на Дніпрі (СКРЦ «Галеон»)	Дебаркадер «Галеон», берегова зона Київського водосховища	Приклад інтеграції антропогенних об'єктів у природне середовище	Аналіз взаємодії природних та антропогенних компонентів ландшафту
4	Київське водосховище: історія та сучасність	Акваторія Київського водосховища, оглядовий майданчик	Висвітлення екологічних наслідків створення Київського водосховища та його ролі у функціонуванні екосистем	Ознайомлення з історією гідротехніч-ного будівництва та його впливом на довкілля
5	Флора та фауна Київського моря	Водно-болотні угіддя, прибережна рослинність, місця перебування птахів та риб	Збереження біорізноманітт охорона рідкісних видів флори і фауни	Вивчення видового різноманіття та екологічних особливостей природних комплексів
6	Спостереження за птахами у Межигір'ї	Голубник, водоплавні та навколоводні птахи, орнітофауна водосховища	Моніторинг стану популяцій птахів та охорона місць їх перебування	Формування знань про роль птахів у функціонуванні екосистем та їх охоронний статус

нюються результати екскурсії, аналізуються основні процеси антропогенної трансформації природного середовища та їх вплив на функціонування сучасних екосистем. Особлива увага приділяється питанням зміни клімату, збереження біорізноманіття, раціонального використання природних ресурсів та ролі природно-заповідних територій у забезпеченні екологічної безпеки регіону. Завершальна зупинка формує цілісне уявлення про взаємозв'язок природних і антропогенних процесів та підкреслює значення екологічної освіти як важливого інструменту охорони довкілля і сталого розвитку.

Під час розроблення маршруту особливу увагу приділено мінімізації антропогенного впливу на природні комплекси. Стежка прокладена виключно існуючими доріжками, що дає змогу уникнути порушення рослинного покриву та місць існування представників фауни. Водночас маршрут охоплює найбільш цінні природні, історичні та рекреаційні об'єкти, забезпечуючи комплексне ознайомлення відвідувачів із природною спадщиною парку.

Запропонована еколого-просвітницька стежка може використовуватися для проведення навчальних практик, екскурсій для учнівської молоді, тематичних еколого-просвітницьких заходів, наукових досліджень та моніторингу стану природних екосистем. Її функціонування сприятиме формуванню екологічної свідомості населення, популяризації природоохоронних знань, розвитку екологічного туризму та впровадженню принципів сталого природокористування на території ППСПМЗДЗ «Межигір'я».

З метою комплексної оцінки запропонованого маршруту проведено аналіз кожної тематичної зупинки за трьома основними критеріями: екологічною цінністю, рекреаційною привабливістю та еколого-освітнім потенціалом. Такий підхід дав змогу визначити найбільш інформативні та перспективні ділянки маршруту для організації екологічної освіти, природоохоронної діяльності та регульованої рекреації. Результати оцінювання наведено в табл. 2.

Як видно з таблиці 2, усі тематичні зупинки характеризуються високим рівнем екологічної та освітньої цінності. Найвищу інтегральну оцінку отримала зупинка «Київське водосховище: історія та сучасність» (15 балів), що зумовлено поєднанням високої природоохоронної, пізнавальної та рекреаційної значущості.

Дещо нижчі, але також високі показники мають зупинки «Флора та фауна Київського моря», «Спостереження за птахами» та «Гребля» (14 балів), які є найбільш перспективними для проведення тематичних екскурсій, польових досліджень та еко-

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

Таблиця 2

Оцінка екологічної та рекреаційної цінності зупинок еколого-просвітницької стежки «Корабель на Дніпрі: шляхами екологічних трансформацій»

№ зупин-ки	Назва зупинки	Екологічна цінність (1–5 балів)	Рекреаційна привабливість (1–5 балів)	Освітня цінність (1–5 балів)	Загальна оцінка
1	Стежка до корабля на водах Дніпра	4	4	4	12
2	Гребля	5	4	5	14
3	Корабель на Дніпрі (СКРЦ «Галеон»)	3	5	4	12
4	Київське водосховище: історія та сучасність	5	5	5	15
5	Флора та фауна Київського моря	5	4	5	14
6	Спостереження за птахами у Межигір'ї	5	4	5	14

логічного моніторингу. Отримані результати підтверджують доцільність створення еколого-просвітницької стежки та свідчать про її високий потенціал як інструменту екологічної освіти, популяризації природоохоронних знань і раціональної організації рекреаційної діяльності на території ППСПМЗДЗ «Межигір'я».

Для комплексної оцінки перспектив функціонування запропонованої еколого-просвітницької стежки, визначення її конкурентних переваг, обмежень, потенційних можливостей розвитку та чинників ризику проведено SWOT-аналіз (рис. 2). Використання цього методу дало змогу оцінити не лише сучасний стан маршруту, а й визначити основні напрями його подальшого вдосконалення як складової еколого-освітньої інфраструктури парку.

Проведений SWOT-аналіз засвідчив значний потенціал еколого-просвітницької стежки «Корабель на Дніпрі: шляхами екологічних трансформацій» для розвитку екологічної освіти, природоохоронної діяльності та екологічного туризму на території ППСПМЗДЗ «Межигір'я». До основних переваг маршруту належать його розташування в межах цінних природних комплексів Київського водосховища, поєднання природних і антропогенно трансформованих ландшафтів, наявність об'єктів історико-культурної спадщини та високий еколого-освітній потенціал.

Водночас функціонування стежки стримується низкою чинників, серед яких недостатній рівень інформаційного забезпечення, потреба в удосконаленні навігації маршруту, обмеженість фінансування та відсутність систематичного моніторингу рекреаційного навантаження. Виявлені недоліки можуть бути усунуті шляхом впровадження сучасних засобів інтерпретації природної спадщини, облаштування інформаційних стендів, створення цифрового супроводу маршруту та залучення грантових коштів.

Аналіз можливостей показав перспективність використання екологічної стежки як платформи для проведення польових занять, екскурсій, наукових досліджень і природоохоронного моніторингу. Важливим напрямом розвитку є інтеграція маршруту до регіональних туристичних продуктів та впровадження сучасних цифрових технологій, зокрема QR-кодів, мобільних додатків і геоінформаційних сервісів.

Серед потенційних загроз найбільш суттєвими є зростання рекреаційного навантаження, негативний вплив кліматичних змін, забруднення прибережних територій та можливе порушення природних комплексів унаслідок неконтрольованого відвідування. У зв'язку з цим подальший розвиток екологічної стежки має ґрунтуватися на принципах сталого природокористування, поєднанні еколого-освітньої діяльності з природоохоронними заходами та постійному моніторингу стану екосистем уздовж маршруту.

Висновки. У результаті проведених досліджень обґрунтовано доцільність створення еколого-просвітницької стежки «Корабель на Дніпрі: шляхами екологічних трансформацій» на території Паркупам'ятки садово-паркового мистецтва загальнодержавного значення «Межигір'я». Встановлено, що поєднання природних, антропогенно трансформованих та історико-культурних об'єктів формує значний потенціал території для розвитку екологічної освіти, наукових досліджень, регульованої рекреації та екологічного туризму.

За результатами маршрутних обстежень розроблено маршрут екологічної стежки, який включає шість тематичних зупинок, що відображають основні етапи антропогенної трансформації природних екосистем Київського водосховища, особливості функціонування прибережних природних комплексів, сучасний стан біорізноманіття та історію формування території парку. Запропонований маршрут прокладено існуючою мережею пішохідних доріжок, що мінімізує негативний вплив на природні

Слабкі сторони (Weaknesses):

- відсутність єдиної системи навігації маршруту;
- недостатній рівень цифрового супроводу екологічної стежки;
- обмежене фінансування природоохоронних та еколого-освітніх заходів;
- відсутність систематичного моніторингу рекреаційного навантаження на окремих ділянках маршруту.

Сильні сторони (Strengths):

- розташування маршруту на території ППСПМЗДЗ «Межигір'я», що має високий природоохоронний статус;
- поєднання природних, антропогенно трансформованих та історико-культурних об'єктів на одному маршруті;
- високий потенціал для проведення екологічної освіти та просвітницької діяльності;
- наявність різноманітних екосистем (лісових, лучних, прибережно-водних та водно-болотних);
- доступність маршруту для різних категорій відвідувачів;
- можливість використання стежки для проведення польових практик і наукових досліджень.

Можливості (Opportunities):

- розвиток екологічного туризму та рекреації на території парку;
- залучення грантових коштів для розвитку еколого-просвітницької інфраструктури;
- створення цифрової екологічної стежки із застосуванням QR-кодів та мобільних додатків;
- проведення наукових досліджень і моніторингових спостережень на базі маршруту;
- інтеграція стежки до регіональних туристичних та освітніх програм;
- розширення співпраці із закладами освіти та природоохоронними установами.

Загрози (Threats):

- зростання рекреаційного навантаження та ризик деградації природних комплексів;
- забруднення прибережної зони Київського водосховища побутовими відходами;
- негативний вплив кліматичних змін на водні та прибережні екосистеми;
- можливе пошкодження елементів інфраструктури відвідувачами;
- недостатнє фінансування природоохоронних заходів та підтримки маршруту;
- посилення антропогенного впливу на прилеглі природні території.

Рис. 2. SWOT-аналіз еколого-просвітницької стежки «Корабель на Дніпрі: шляхами екологічних трансформацій»

комплекси та відповідає принципам сталого природокористування.

Комплексна оцінка тематичних зупинок засвідчила їх високий природоохоронний, рекреаційний та еколого-освітній потенціал. Найвищі показники отримали зупинки, присвячені Київському водосховищу, природним екосистемам та орнітофауні, що свідчить про їх перспективність для проведення навчальних практик, екологічних екскурсій, польових досліджень і моніторингових спостережень.

Проведений SWOT-аналіз підтвердив доцільність упровадження еколого-просвітницької стежки як ефективного інструменту природоохоронної діяльності та екологічної освіти. Визначено основні переваги маршруту, перспективи його розвитку, а також чинники, що потребують подальшого врахування під час організації рекреаційного використання території та удосконалення еколого-просвітницької інфраструктури.

Практичне значення виконаного дослідження полягає у можливості використання запропонованої екологічної стежки під час проведення еколого-просвітницьких заходів, навчальних практик здобувачів вищої освіти, екологічного моніторингу та популяризації природної спадщини ППСПМЗДЗ «Межигір'я».

Література

1. Дзиба А. А., Покотилова К. Г. Модельна екологічна стежка парку-памятки садово-паркового мистецтва «Байрак». *Науковий вісник НЛТУ України*. 2014. № 7. Том 26. С. 71–77. https://nv.nltu.edu.ua/index.php/journal/article/view/514
2. Галкін С. І., Калашнікова Л. В., Дойко Н. М., Рубіс В. Л., Бойко Н. С. Екологічна стежка державного дендропарку «Олександрія» НАН України як форма соціальної структури на природно-заповідних територіях. *Екосистеми, Оптимізація і Охорона*. 2014. № 10. С. 221–226.
3. Антоненко І., Мельник І. Розроблення проєкту екотуристичних шляхів на об'єктах природно-заповідного фонду регіону. *Економіка та суспільство*. 2023. № 52. С. 8-18. https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-52-63
4. Гавриленко О. П., Циганок Є. Ю., & Доленко В. О. Ландшафтно-екологічні маршрути в межах міських природо-охоронних територій: просвітницька та еколого-освітня роль. *Landscape Science*. 2025. № 8(2). С. 82–93. https://doi.org/10.31652/2786-5665-2025-8-82-93
5. Коллегаєв М. Європейська мережа піших маршрутів як система організації масової фізичної рекреації та спорту. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка*. 2026. № 2. С. 100-107. https://doi.org/10.25128/2519-4577.26.2.10
6. Офіційний сайт ПП СПМ ЗДЗ «Межигіря». Вейб-сайт. https://mezhyhiria.mepr.gov.ua/zahalna-informatsiia (Дата звернення 10.07.2026 р.)

Дата першого надходження статті до видання: 21.07.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

УДК 502.51(285)
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.45

ТАКСОНОМІЧНИЙ СКЛАД ФІТОПЛАНКТОНУ ОЗЕР НОБЕЛЬСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО ПРИРОДНОГО ПАРКУ

Суходольська І.Л. (orcid.org/0000-0001-7502-3061)
Рівненський державний гуманітарний університет
вул. Ст. Бандери, 12, 33028, м. Рівне
iryna.sukhodolska@rshu.edu.ua

У статті наведено таксономічний склад фітопланктону 8 озер Нобельського національного природного парку (серпень, 2025 р.). У озерах ідентифіковано 95 видів водоростей, що представлені 97 внутрішньовидовими таксонами (ввт) з восьми відділів. Флористичний спектр планктонних водоростей сформовано відділами *Chlorophyta* > *Bacillariophyta* > *Euglenozoa* > *Cyanobacteria* > *Charophyta* > *Ochrophyta* > *Miozoa* > *Cryptista.* Високий показник родового коефіцієнту встановлено для відділу *Euglenozoa* (3,8). Найбільш виражені роди *Trachelomonas* Ehrenberg, *Euglena* Ehrenberg, *Lepocinclis* Perty, *Phacus* Dujardin та *Staurastrum* Meyen ex Ralfs. Спільні види для чотирьох і більше озер представлені *Limnococcus limneticus* (Lemmermann) Komárková, Jezberová, O. Komárek & Zapomelová, *Snowella lacustris* (Chodat) Komárek & Hindák, *Trachelomonas volvocina* (Ehrenberg) Ehrenberg, *Hindakia tetrachotoma* (Printz) C. Bock, Pröschold & Krienitz та *Cyclotella sp.* Високою біомасою вирізняється *Glenodinium sp.* (оз. Хоромне – 69,1%, оз. Середнє – 35,7%, оз. Засвітське – 23,6%), *Tabellaria fenestrata* (Lyngbye) Kützing (оз. Велике – 39,9%), *Aulacoseira granulata* (Ehrenberg) Simonsen (оз. Ніговищі – 33,6%), *Ceratium hirundinella* (O.F. Müller) Dujardin (оз. Задовже – 57,4%), *Epithemia turgida* (Ehrenberg) Kützing (оз. Нобель – 25,9%), *T. volvocina* (оз. Омит – 21,2%). Найменша біомаса виявлена для фітопланктону оз. Задовже (0,0305 мг/дм^3), а найбільша – для оз. Омит (1,3002 мг/дм^3). Найнижча чисельність характерна для фітопланктону оз. Задовже (127 тис. кл/дм^3), а найвища – для оз. Ніговищі (3484 тис. кл/дм^3). Індекс Шеннона змінюється від 1,06 біт/мг (оз. Хоромне) до 3,95 біт/мг (оз. Ніговищі) за біомасою та 1,26 біт/екз (оз. Хоромне) до 4,01 (оз. Омит) біт/екз за чисельністю. Індекс сапробності коливається від 1,24 (оз. Задовже – олігосапробна зона самоочищення, якість води – чиста) до 2,39 (оз. Середнє – β-мезосапробна, якість води – помірно забруднена). *Ключові слова:* озера, чисельність, біомаса, домінанти, сапробність, індекс Шеннона, види, фітопланктон, природно-заповідні території

Taxonomic structure of phytoplankton in the lakes of the Nobel National Nature Park. Sukhodolska I.

This article presents the taxonomic composition of phytoplankton in eight lakes of the Nobel National Nature Park based on samples collected in August 2025. A total of 95 algal species, represented by 97 infraspecific taxa (tws), belonging to eight phyla, were identified. The floristic composition of the phytoplankton was dominated by the following phyla: *Chlorophyta* > *Bacillariophyta* > *Euglenozoa* > *Cyanobacteria* > *Charophyta* > *Ochrophyta* > *Miozoa* > *Cryptista*. The highest genus coefficient was recorded for the phylum *Euglenozoa* (3.8). The most species-rich genera were *Trachelomonas* Ehrenberg, *Euglena* Ehrenberg, *Lepocinclis* Perty, *Phacus* Dujardin, and *Staurastrum* Meyen ex Ralfs. Species occurring in four or more lakes included *Limnococcus limneticus* (Lemmermann) Komárková, Jezberová, O. Komárek & Zapomelová, *Snowella lacustris* (Chodat) Komárek & Hindák, *Trachelomonas volvocina* (Ehrenberg) Ehrenberg, *Hindakia tetrachotoma* (Printz) C. Bock, Pröschold & Krienitz, and *Cyclotella* sp. The highest phytoplankton biomass was contributed by *Glenodinium* sp. in Lake Khoromne (69.1%), Lake Seredne (35.7%), and Lake Zasvitske (23.6%), *Tabellaria fenestrata* (Lyngbye) Kützing in Lake Velyke (39.9%), *Aulacoseira granulata* (Ehrenberg) Simonsen in Lake Nigovishche (33.6%), *Ceratium hirundinella* (O.F. Müller) Dujardin in Lake Zadovzhe (57.4%), *Epithemia turgida* (Ehrenberg) Kützing in Lake Nobel (25.9%) and *Trachelomonas volvocina* in Lake Omyt (21.2%). The lowest phytoplankton biomass was recorded in Lake Zadovzhe (0.0305 mg/dm^3), whereas the highest biomass was observed in Lake Omyt (1.3002 mg/dm^3). The lowest phytoplankton abundance was also recorded in Lake Zadovzhe (127 thous. cells/dm^3), while the highest abundance was found in Lake Nigovishche (3484 thous. cells/dm^3). The Shannon diversity index ranged from 1.06 bits/mg (Lake Khoromne) to 3.95 bits/mg (Lake Nigovishche) based on biomass, and from 1.26 bits/sp (Lake Khoromne) to 4.01 bits/sp (Lake Omyt) based on abundance. The saprobity index varied from 1.24 in Lake Zadovzhe (oligosaprobic zone, indicating clean water with a high self-purification capacity) to 2.39 in Lake Seredne (β-mesosaprobic zone, indicating moderately polluted water). *Key words:* lakes, phytoplankton, algal diversity, species composition, abundance, biomass, dominant species, saprobity, Shannon diversity index, protected areas.

Постановка проблеми. Озера природно-заповідних територій відрізняються від інших водних об'єктів насамперед різною швидкістю дії екологічних чинників на формування показників якості води та видового складу фітопланктону.

Актуальність дослідження. Оцінювання показників стійкості та рівня забруднення озер природно-заповідних територій ускладняються внаслідок специфічності фізичних процесів та явищ. Оскільки гідродинамічні особливості озер часто маскують ознаки критичних змін у водоймі, що відбуваються вже тривалий час. Проте дослідження стану біотичної складової, насамперед фітопланктону, відображає стан всієї водної екосистеми та дозволяє побачити сукцесійні зміни природного і антропогенного походження. Ступінь толерантності видів фітопланк-

© Суходольська І.Л., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

тону до умов середовища враховує навіть мінімальні негативні прояви, що допомагає нормалізувати стан водних екосистем, особливо в межах природно-заповідних територій [1, 2, 3].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та науково-практичними завданнями. Фітопланктон озер природно-заповідних територій зазвичай характеризується високим видовим багатством. Особливості розташування озер та їхня віддаленість від суттєвих джерел забруднення визначають якість води та добрий розвиток основних відділів, що формують ядро фітопланктону. Дослідження фітопланктону озер Нобельського національного природного парку (НПП) необхідне для розробки заходів щодо підтримання рівноваги екосистем та збереження біорізноманіття.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивчення складу фітопланктону озер природно-заповідних територій відображено у працях багатьох науковців [1, 4, 5, 6, 7, 8]. Описуючи фітопланктон кратерного озера дослідники зазначають про суттєвий розвиток *Bacillariophyta* (91,21% від загальної чисельності фітопланктону). Усі види відділу *Bacillariophyta* зазнавали сезонних змін (за винятком *Cocconeis sp.*). Водночас автори наголошують на найкраще поширення видів роду *Navicula* [5]. Вивчаючи різноманітність фітопланктону озер Державного національного природного парку «Бурабай» (Республіка Казахстан) автори [1] акцентують увагу на двох основних чинниках, що регулюють склад фітопланктону – солоність та органічне забруднення. Серед суттєвих джерел потрапляння органічних речовин наводять прибережні зони біля яких розташовані курорти та населені пункти. У роботах [8, 9, 10] описано розвиток фітопланктону озер Нобельського НПП. Зокрема, наведено видове багатство оз. Засвітське (2022 р.), що представлене 61 (62 ввт.) видом водоростей. Особливістю фітопланктону озера є високі показники чисельності та біомаси виду відділу *Charophyta* – *Spondylosium ellipticum* West & G.S. West [8]. Структура фітопланктону оз. Задовже наведена у працях [2, 9, 10]. Фітопланктон оз. Задовже налічує у 2022 р. 76 (77 ввт) видів водоростей [9], у 2023 р. – 100 (105 ввт) видів, а у 2024 р. – 53 (55 ввт) види [10]. Загалом, видове багатство озер може суттєво відрізнятися, тому потребує тривалого моніторингу.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Відомості про фітопланктон озер природно-заповідних територій у літературних джерелах наведені фрагментарно. Серед 12 озер, що розташовані на території Нобельського НПП, лише для 2 озер (Засвітське та Задовже) наведено списки видів фітопланктону. Водночас для оцінки стану стійкості та збереження біорізноманіття інших озер необхідно вивчити особливості видового багатства фітопланктону.

Новизна. Уперше визначено видове багатство, чисельність та біомасу фітопланктону озер Нобельського НПП (оз. Хоромне, оз. Велике, оз. Середнє, оз. Ніговищі, оз. Нобель і оз. Омит). Наведено доповнення до списків видів фітопланктону оз. Засвітське і оз. Задовже, що досліджені в попередні роки.

Методологічне або загальнонаукове значення. Визначені особливості таксономічного складу фітопланктону озер Нобельського НПП дозволять оцінити стійкість чи вразливість екосистем, сформувати списки видового багатства, а також доповнити вже існуючі відомості про планктонні угруповання, розробити заходи щодо збереження біорізноманіття.

Викладення основного матеріалу. Для дослідження фітопланктону проби води відбирали з 8 озер Нобельського НПП (оз. Хоромне – 51°43'20.9»N 25°50'24.6»E, оз. Велике – 51°43'14.9»N 25°49'48.4»E, оз. Середнє – 51°43'15.3»N 25°50'20.3»E, оз. Засвітське – 51°52'35.2»N 25°44'14.0»E, оз. Ніговищі – 51°54'11.7»N 25°40'58.5»E, оз. Задовже – 51°49'45.8»N 25°42'56.0»E, оз. Нобель –51°51'13.9»N 25°44'58.7»E та оз. Омит – 51°54'42.3»N 25°46'28.4»E) у серпні 2025 р. з глибини 0,2–0,3 м шляхом наповнення пластикових ємностей об'ємом 0,5 дм^3. Відібрані проби консервували формаліном. Після відстоювання проби концентрували до об'єму 0,05–0,1 дм^3. Камеральну обробку проб проводили з використанням світлового мікроскопу «Laboval» (Karl Zeiss, (Germany)), що включала визначення видового складу, біомаси і чисельності. Клітини рахували за допомогою камери Нажотта (об'єм 0,02 см^3) у трьох повторностях. Біомасу визначали розрахунково-об'ємним методом [11]. Таксономічну номенклатуру водоростей наведено відповідно до даних міжнародного електронного каталогу *AlgaeBase* [12]. Індикаторні особливості фітопланктону представлено відповідно до літературних джерел [3].

Фітопланктон озер Нобельського НПП представлений 95 видами (97 внутрішньовидовими таксонами (ввт.)), 15 класами, 24 порядками, 37 родинами, 68 родами, які належать до восьми відділів (табл. 1, табл. 2).

За флористичним відношенням найбільш представлені види відділів *Chlorophyta* (35,7% загальної кількості видів), *Bacillariophyta* (16,3%), *Euglenozoa* (15,3%) і *Cyanobacteria* (11,2%). Найвище значення родового коефіцієнту характерно для відділу *Euglenozoa* (3,8).

Найбільш виражені роди відділу *Euglenozoa* – *Trachelomonas* Ehrenberg (4 види), *Lepocinclis* Perty (4 види), *Phacus* Dujardin (4 види) і *Euglena* Ehrenberg (3 види), а також відділу *Charophyta* – *Staurastrum* Meyen ex Ralfs (3 види).

Фітопланктон оз. Хоромне у серпні налічує 4 види, що належать до трьох відділів – *Cyanobacteria*,

Таблиця 1

Таксономічний спектр водоростевих угруповань озер Нобельського НПП

	Відділ	Клас	Порядок	Родина	Рід	Вид	Ввт	Родовий коефіцієнт
1	*Chlorophyta*	2	4	12	27	34	35	1,3
2	*Bacillariophyta*	4	8	9	15	15	16	1,1
3	*Cyanobacteria*	1	2	3	9	11	11	1,2
4	*Charophyta*	2	2	3	4	9	9	2,3
5	*Ochrophyta*	3	4	4	5	6	6	1,2
6	*Euglenozoa*	1	1	2	4	15	15	3,8
7	*Miozoa*	1	2	3	3	3	3	1,0
8	*Cryptista*	1	1	1	1	2	2	2,0
	Всього:	**15**	**24**	**37**	**68**	**95**	**97**	**1,7**

Miozoa та *Ochrophyta*. За чисельністю та біомасою домінують види відділу *Miozoa – Glenodinium sp.* (11,9% та 69,1%) і *Ochrophyta – Dinobryon divergens* O.E. Imhof (72,9% та 27,7%).

7 видами представлений фітопланктон оз. Велике, що належить до 5 відділів (*Cyanobacteria, Miozoa, Chlorophyta, Charophyta* та *Bacillariophyta*). За чисельністю домінують види відділів *Cyanobacteria – Snowella lacustris* (Chodat) Komárek & Hindák (67,5%) і *Bacillariophyta – Tabellaria fenestrata* (Lyngbye) Kützing (23,0%), а за біомасою види *Miozoa – Ceratium hirundinella* (O.F. Müller) Dujardin (39,9%) та *Bacillariophyta – T. fenestrata* (47,3%).

Більшою кількістю видів (13), у порівнянні з попередніми озерами, представлений фітопланктон оз. Середнє. За чисельністю домінує вид відділу *Cyanobacteria – Merismopedia tenuissima* Lemmermann (63,9%), а за біомасою види відділу *Miozoa – Glenodinium sp.* (35,7%) та *Charophyta – Cosmarium sp.* (16,5%) і *Staurodesmus cuspidatus* (Brébisson) Teiling (24,7%).

Фітопланктон оз. Засвітське налічує 12 видів з 5 відділів. За чисельністю домінують види відділу *Cyanobacteria – Limnococcus limneticus* (Lemmermann) Komárková, Jezberová, O. Komárek & Zapomelová (26,8%), *S. lacustris* (26,8%) та види відділу *Chlorophyta – Mucidosphaerium pulchellum* (H.C. Wood) C. Bock, Proschold & Krienitz (10,0%), *Neocystis ovalis* (Korshikov) Hindák (13,4%), *Planctonema sp.* (13,4%). За біомасою домінує вид відділу *Cyanobacteria – L. limneticus* (11,5%), вид відділу *Miozoa – Glenodinium sp.* (23,6%), а також види відділу *Chlorophyta – N. ovalis* (12,3%) і *Planctonema sp.* (19,7%).

Велика кількість видів фітопланктону встановлена у оз. Ніговищі – 38 (39 ввт). За чисельністю домінують види відділу *Cyanobacteria – Microcystis pulverea* (H.C. Wood) Forti (17,2%) і *Microcystis aeruginosa* (Kützing) Kützing (25,8%). За біомасою домінує вид відділу *Bacillariophyta – Aulacoseira granulata* (Ehrenberg) Simonsen (33,6%), що є індикатором β-мезосапробної зони самоочищення (якість води – помірно забруднена).

Фітопланктон оз. Задовже налічує 9 видів, що належать до 5 відділів. За чисельністю домінують види відділу *Cyanobacteria – S. lacustris* (63,0%), *Anabaena sp.* (11,8%), а за біомасою вид відділу *Miozoa – C. hirundinella* (57,4%), види відділів *Bacillariophyta – Fragilaria crotonensis* Kitton (11,8%) і *Euglenozoa – Trachelomonas volvocina* (Ehrenberg) Ehrenberg (12,3%).

23 види налічує фітопланктон оз. Нобель, що належить до 6 відділів. За чисельністю домінують вид відділу *Cyanobacteria – Dolichospermum flos-aquae* (Bornet & Flahault) P. Wacklin, L. Hoffmann & Komárek (11,3%), відділу *Chlorophyta – Phacotus coccifer* Korshikov (10,9%), *Stauridium tetras* (Ehrenberg) E. Hegewald (14,5%), *Lemmermannia tetrapedia* (Kirchner) Lemmermann (14,5%). За біомасою домінують види *Euglenozoa – T. volvocina* (15,1%), відділу *Chlorophyta – Ph. coccifer* (12,7%), *Desmodesmus intermedius* (Chodat) E. Hegewald (12,7%) та відділу *Bacillariophyta – Epithemia turgida* (Ehrenberg) Kützing (25,9%).

Найбільша кількість видів фітопланктону характерна для оз. Омит – 44 (45 ввт). За чисельністю домінують види відділу *Cyanobacteria – S. lacustris* (13,0%) та *Woronichinia compacta* (Lemmermann) Komárek & Hindák (10,4%) і вид відділу *Euglenozoa – T. volvocina* (14,9%). За біомасою домінують лише види відділу *Euglenozoa – T. volvocina* (21,2%) та *Trachelomonas hispida* (Perty) F. Stein (11,8%).

Зустрічаються у озерах спільні види – *L. limneticus*, *S. lacustris*, *T. volvocina* – для 5 озер; *Glenodinium sp.*, *Hindakia tetrachotoma* (Printz) C. Bock, Pröschold & Krienitz, *Cyclotella sp.* – для 4 озер; *Anabaena sp.*, *Ceratium hirundinella*, *T. hispida*, *Ankistrodesmus arcuatus* Korshikov, *Stauridium tetras* (Ehrenberg) E. Hegewald, *Pediastrum duplex* Meyen, *Lemmermannia tetrapedia* (Kirchner) Lemmermann – для 3 озер.

Таблиця 2

Список. Таксономічний склад фітопланктону озер Нобельського НПП (Хоромне, Велике, Середнє, Засвітське, Ніговищі, Задовже, Нобель, Омит – серпень, 2025)

№	Таксони	Озера							
		Хоромне	Велике	Середнє	Засвітське	Ніговищі	Задовже	Нобель	Омит
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	CYANOBACTERIA								
	Клас *Cyanophyceae* Hauck								
	Порядок *Chroococcales* Schaffner								
	Родина *Cyanothrichaceae* Elenkin								
1	*Limnococcus limneticus* (Lemmermann) Komárková, Jezberová, O. Komárek & Zapomelová	+	+		+	+			+
	Родина *Microcystaceae* Elenkin								
2	*Coelosphaerium radiatum* G.M. Smith					+			
3	*Merismopedia tenuissima* Lemmermann			+					
4	*Microcystis aeruginosa* (Kützing) Kützing					+			
5	*Microcystis pulverea* (H.C. Wood) Forti					+			
6	*Snowella lacustris* (Chodat) Komárek & Hindák		+		+	+	+		+
7	*Woronichinia compacta* (Lemmermann) Komárek & Hindák								+
	Порядок *Nostocales* Borzì								
	Родина *Aphanizomenonaceae* Elenkin								
8	*Anabaena sp.*					+	+		+
9	*Aphanizomenon flos-aquae* Ralfs ex Bornet & Flahault								+
10	*Dolichospermum flos-aquae* (Bornet & Flahault) P. Wacklin, L. Hoffmann & Komárek							+	
11	*Dolichospermum spiroides* (Klebahn) Wacklin, L. Hoffmann & Komárek			+					
	MIOZOA								
	Клас *Dinophyceae* Pascher								
	Порядок *Gonyaulacales* F.J.R. Taylor								
	Родина *Ceratiaceae* Kofoid								
12	*Ceratium hirundinella* (O.F. Müller) Dujardin		+				+		+
	Порядок *Peridiniales* Macalister								
	Родина *Peridiniales familia incertae sedis*								
13	*Glenodinium sp.*	+		+	+				+
	Родина *Peridiniopsidaceae* Gottschling, Kretschmann & Zerdoner Casalan								
14	*Palatinus apiculatus* (Ehrenberg) Craveiro, Calado, Daugbjerg & Moestrup								+
	EUGLENOZOA								
	Клас *Euglenophyceae* Schoenichen								
	Порядок *Euglenales* F. Stein								
	Родина *Euglenaceae* Dujardin								
15	*Euglena granulata* (G.A. Klebs) F. Schmitz					+			+
16	*Euglena matvienkoi* T.G. Popova								+
17	*Euglena sp.*					+			
18	*Trachelomonas armata* (Ehrenberg) F. Stein								+
19	*Trachelomonas hispida* (Perty) F. Stein					+		+	+
20	*Trachelomonas planctonica* Svirenko								+
21	*Trachelomonas volvocina* (Ehrenberg) Ehrenberg				+	+	+	+	+
	Родина *Phacaceae* J.I. Kim, Triemer & W. Shin								
22	*Lepocinclis spirogyroides* B. Marin & Melkonian					+			+

Продовження табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
23	*Lepocinclis fusiformis* (H.J. Carter) Lemmermann								+
24	*Lepocinclis ovum* (Ehrenberg) Lemmermann								+
25	*Lepocinclis hispidula* (Eichwald) Daday					+			+
26	*Phacus polytrophos* Pochmann								+
27	*Phacus pleuronectes* (O.F. Müller) Nitzsch ex Dujardin					+			+
28	*Phacus caudatus* Hübner					+			+
29	*Phacus ovalis* (Woronichin) T.G. Popova							+	
	CHLOROPHYTA								
	Клас *Chlorophyceae* Wille								
	Порядок *Sphaeropleales* Luerssen								
	Родина *Selenastraceae* Blackman & Tansley								
30	*Ankistrodesmus arcuatus* Korshikov					+	+	+	
31	*Ankistrodesmus fusiformis* Corda				+			+	
32	*Quadrigula korsikovii* Komárek				+				
33	*Monoraphidium irregulare* (G.M. Smith) Komárková-Legnerová								+
34	*Monoraphidium griffithii* (Berkeley) Komárková-Legnerová								+
	Родина *Radiococcaceae* Fott ex P.C. Silva								
35	*Neocystis ovalis* (Korshikov) Hindák				+				
	Родина *Scenedesmaceae* Oltmanns								
36	*Coelastrum astroideum* De Notaris			+					+
37	*Coelastrum microporum* Nägeli					+			
38	*Desmodesmus communis* (E. Hegewald) E. Hegewald					+			
39	*Desmodesmus intermedius* (Chodat) E. Hegewald							+	
40	*Scenedesmus obtusus* Meyen							+	
41	*Scenedesmus obtusus* f. *disciformis (Chodat) Compère*					+			
42	*Tetradesmus obliquus* (Turpin) M.J. Wynne			+					
43	*Tetrastrum staurogeniiforme* (Schröder) Lemmermann							+	
	Родина *Neochloridaceae* Ettl & Komárek								
44	*Chlorotetraedron incus* (Teiling) Komárek & Kovácik							+	
	Родина *Schroederiaceae* Fuciková, P.O. Lewis & L.A. Lewis								
45	*Schroederia setigera* (Schröder) Lemmermann							+	
	Родина *Hydrodictyaceae* Dumortier								
46	*Stauridium tetras* (Ehrenberg) E. Hegewald					+		+	+
47	*Pediastrum duplex* Meyen					+		+	+
48	*Pseudopediastrum boryanum* (Turpin) E. Hegewald								+
49	*Tetraëdron caudatum* (Corda) Hansgirg			+					
50	*Tetraëdron triangulare* Korshikov								
	Порядок *Volvocales* Oltmanns								
	Родина *Chlamydomonadaceae* F. Stein								
51	*Microglena monadina* Ehrenberg							+	+
52	*Chlamydomonas reinhardtii* P.A. Dangeard, nom. cons.								+
53	*Chlamydomonas sp.*					+			
	Родина *Phacotaceae* Francé								
54	*Phacotus coccifer* Korshikov							+	
	Родина *Chlorangiellaceae* Fott								
55	*Chlorangium epizooticum* (Pascher) Ettl					+			
	Клас *Trebouxiophyceae* Friedl								
	Порядок *Chlorellales* H.C. Bold & M.J. Wynne								

Продовження табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Родина *Chlorellaceae* Brunnthaler									
56	*Actinastrum gracillimum* G.M. Smith								+
57	*Hindakia tetrachotoma* (Printz) C. Bock, Pröschold & Krienitz		+			+		+	+
58	*Chlorella sp.*				+				
59	*Mucidosphaerium pulchellum* (H.C. Wood) C. Bock, Proschold & Krienitz				+				
Родина *Oocystaceae* Bohlin									
60	*Willea apiculata* (Lemmermann) D.M. John, M.J. Wynne & P.M. Tsarenko								+
61	*Oocystis submarina* Lagerheim						+		+
62	*Oocystis borgei* J.W. Snow			+	+				
63	*Planctonema sp.*				+				+
Порядок *Trebouxiophyceae ordo incertae sedis*									
Родина *Trebouxiophyceae incertae sedis*									
64	*Lemmermannia tetrapedia* (Kirchner) Lemmermann			+		+		+	
CHAROPHYTA									
Клас *Zygnematophyceae* Round ex Guiry									
Порядок *Desmidiales* Bessey									
Родина *Closteriaceae* Bessey									
65	*Closterium acutum* Brébisson					+			+
66	*Closterium exiguum* West & G.S. West								+
Родина *Desmidiaceae* Ralfs									
67	*Cosmarium margaritiferum* Meneghini ex Ralfs								
68	*Cosmarium sp.*			+					
69	*Staurastrum cingulum* (West & G.S. West) G.M. Smith		+	+					
70	*Staurastrum sp.*					+			
71	*Staurastrum tetracerum* Ralfs ex Ralfs					+		+	
72	*Staurodesmus cuspidatus* (Brébisson) Teiling			+					
Клас *Klebsormidiophyceae* C. Jeffrey ex Guiry									
Порядок *Klebsormidiales* K.D. Stewart & K.R. Mattox									
Родина *Elakatotrichaceae* Hindák									
73	*Elakatothrix acuta* Pascher					+			
OCHROPHYTA									
Клас *Chrysophyceae* Pascher									
Порядок *Chromulinales* Pascher									
Родина *Dinobryaceae* Ehrenberg									
74	*Dinobryon bavaricum* Imhof	+							
75	*Dinobryon divergens* O.E. Imhof	+		+					
76	*Pseudokephyrion conicum* Schiller								+
Порядок *Synurales* R.A. Andersen									
Родина *Mallomonadaceae* Diesing									
77	*Mallomonas sp.*			+		+			
Клас *Xanthophyceae* P. Allorge ex F.E. Fritsch									
Порядок *Mischococcales* F.E. Fritsch									
Родина *Sciadiaceae* Gobi									
78	*Centritractus belonophorus* (Schmidle) Lemmermann					+			
Клас *Eustigmatophyceae* D.J. Hibberd & Leedale									
Порядок *Goniochloridales* K.P. Fawley, M. Eliás & M.W. Fawley									
Родина *Goniochloridaceae*									
79	*Tetraedriella spinigera* Skuja					+			+

Закінчення табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
BACILLARIOPHYTA									
Клас *Coscinodiscophyceae* Round & R.M. Crawford									
Порядок *Aulacoseirales* R.M. Crawford									
Родина *Aulacoseiraceae* R.M. Crawford									
80	*Aulacoseira granulata* (Ehrenberg) Simonsen					+			+
81	*Aulacoseira granulata* var. *angustissima* (O. Müller) Simonsen								+
Клас *Thalassiosirophyceae* Kociolek, Ashworth & A.J. Alverson									
Порядок *Thalassiosirales* Glezer & I.V. Makarova									
Родина *Thalassiosiraceae* M. Lebour									
82	*Cyclotella sp.*					+	+	+	+
83	*Lindavia glomerata* (H. Bachmann) Adesalu & Julius					+			
84	*Stephanodiscus hantzschii* Grunow							+	
Порядок *Stephanodiscales* Nikolaev & Harwood									
Родина *Stephanodiscaceae* Makarova									
85	*Stephanocyclus meneghinianus* (Kützing) Kulikovskiy, Genkal & Kociolek								+
Клас *Fragilariophyceae* Round									
Порядок *Fragilariales* P.C. Silva									
Родина *Fragilariaceae* Kützing									
86	*Ulnaria acus* (Kützing) Aboal								+
87	*Fragilaria crotonensis* Kitton						+		
Порядок *Tabellariales* Round									
Родина *Tabellariaceae* Kützing									
88	*Asterionella formosa* Hassall					+	+		
89	*Tabellaria fenestrata* (Lyngbye) Kützing		+						
Клас *Bacillariophyceae* Haeckel									
Порядок *Naviculales* Bessey									
Родина *Naviculaceae* Kützing									
90	*Navicula radiosa* Kützing					+			+
Порядок *Cymbellales* D.G. Mann									
Родина *Cymbellaceae* Kützing									
91	*Cymbopleura inaequalis* (Ehrenberg) Krammer					+			
Родина *Gomphonemataceae* Kützing									
92	*Gomphonema sp.*					+			
Порядок *Surirellales* D.G. Mann									
Родина *Surirellaceae* Kützing									
93	*Amphora ovalis* (Kützing) Kützing		+						
94	*Epithemia turgida* (Ehrenberg) Kützing							+	+
95	*Rhopalodia gibba* (Ehrenberg) O. Müller							+	
CRYPTISTA									
Клас *Cryptophyceae* F.E. Fritsch									
Порядок *Cryptomonadales* Pringsheim									
Родина *Cryptomonadaceae* Ehrenberg									
96	*Cryptomonas sp.*				+			+	
97	*Cryptomonas erosa* Eyhrenberg					+			

Відсоток участі видів різних відділів у складі фітопланктону озер Нобельського НПП дуже відрізняється (рис. 1).

Зокрема, у оз. Хоромне не виявлено видів *Bacillariophyta* і *Chlorophyta*. Проте високої чисельності та біомаси досягає вид відділу *Ochrophyta* – *D. divergens* – індикатор олігосапробної зони самоочищення, що свідчить про 2 клас якості води (чиста). Фітопланктон оз. Середнє і Засвітське відрізняється добрим розвитком видів *Chlorophyta* та відсутністю видів *Bacillariophyta.* У фітопланктоні трьох озер (Хоромне, Велике та Середнє) не виявлено видів *Euglenozoa*, що свідчить про низькі концентрації органічних речовин у воді. Однак у інших водних об'єктах (оз. Задовже, Нобель та Омит) домінує за біомасою вид відділу *Euglenozoa – T. volvocina* (12,3–21,2%) – індикатор β-мезосапробної зони самоочищення (3 клас якості, помірно забруднена вода).

Найвища чисельність характерна для оз. Ніговищі, що становить 3484 тис. кл/дм^3. На другому місці за чисельністю фітопланктону оз. Омит (2464 тис. кл/дм^3), а на третьому – оз. Велике (1516 тис. кл/дм^3). Найнижча чисельність встановлена для оз. Задовже (127 тис. кл/дм^3). Щодо біомаси фітопланктону, то максимальні значення зафіксовано у оз. Омит (1,3002 мг/дм^3), а мінімальні – у оз. Задовже (0,0305 мг/дм^3) (рис. 2).

За біомасою фітопланктону якість води оцінено наступним чином: 3 клас, помірно забруднена – оз. Омит; 2 клас, чиста – оз. Хоромне, Велике, Середнє, Ніговищі та Нобель; 1 клас, дуже чиста – оз. Засвітське і Задовже.

Індекс Шеннона змінюється від 1,06 біт/мг (оз. Хоромне) до 3,95 біт/мг (оз. Ніговищі) за біомасою та від 1,26 біт/екз (оз. Хоромне) до 4,01 біт/екз (оз. Омит) за чисельністю (рис. 3).

Індекс сапробності коливається від 1,24 (оз. Задовже – олігосапробна зона самоочищення, якість води – чиста) до 2,39 (оз. Середнє – β-мезосапробна зона самоочищення, якість води – помірно забруднена).

За показниками сапробності якість води оцінено наступним чином: 3 клас, помірно забруднена – оз. Хоромне, Ніговищі, Нобель, Середнє та Омит; 2 клас, чиста – оз. Велике, Засвітське і Задовже.

Досліджені озера характеризуються полідомінантним складом фітопланктону, який найбільш виражений у оз. Ніговищі, оз. Омит, оз. Нобель та оз. Засвітське.

Головні висновки. Таксономічний склад фітопланктону озер Нобельського НПП у серпні 2025 р. налічує 95 видів (97 ввт), які належать до 8 відділів, 15 класів, 24 порядків, 37 родин та 68 родів. Найбільшою кількістю видів представлені відділи *Chlorophyta, Bacillariophyta, Euglenozoa* та *Cyanobacteria.* Найкраще виражені роди відділів *Euglenozoa – Trachelomonas* Ehrenberg, *Lepocinclis* Perty, *Phacus* Dujardin, *Euglena* Ehrenberg і *Charophyta – Staurastrum* Meyen ex Ralfs.

Видове багатство фітопланктону озер розподіляється наступним чином: оз. Омит – 44 (45 ввт.), оз. Ніговищі – 38 (39 ввт.), оз. Нобель – 23, оз. Середнє – 13, оз. Засвітське – 12, оз. Задовже – 9, оз. Велике – 7 та оз. Хоромне – 4. Виявлені спільні види для чотирьох і більше озер (*L. limneticus*, *S. lacustris, T. volvocina*, *H. tetrachotoma* та *Cyclotella sp.*).

Чисельність фітопланктону змінюється від 127 тис. кл/дм^3 (оз. Задовже) до 3484 тис. кл/дм^3 (оз. Ніговищі), а біомаса – від 0,0305 мг/дм^3 (оз. Задовже) до 1,3002 мг/дм^3 (оз. Омит). Максимальне значення індексу Шеннона за біомасою становить 3,95 біт/мг (оз. Ніговищі), а мінімальне – 1,06 біт/мг (оз. Хоромне). За чисельністю індекс Шеннона варіює від 1,26 біт/екз (оз. Хоромне) до 4,01 біт/екз (оз. Омит). Найнижча сапробність встановлена для оз. Задовже (1,24), а найвища – для оз. Середнє (2,39). За сапробністю якість води озер Нобельського НПП відповідає 2 та 3 класу – чиста та помірна забруднена.

Перспективи використання результатів дослідження. Ідентифіковані вперше види фітопланктону озер Нобельського НПП є суттєвим доповненням відомостей щодо флори водоростей України. Окрім цього, список видів фітопланктону озер буде включено до Літопису природи Нобельського НПП. Виявлені структурно-функціональні показники фітопланктону можуть бути використані у подальших моніторингових дослідженнях, в тому числі для оцінювання стану стійкості екосистем та з метою збереження біорізноманіття природно-заповідних територій.

Література

1. Barinova S., Krupa E., Khitrova Y. Phytoplankton Diversity and Bioindication of the Lakes in the Burabay National Natural Park, Northern Kazakhstan. *Ecologies*. 2023. 4. 242–268. URL: https://doi.org/10.3390/ecologies4020017
2. Суходольська І.Л. Використання екологічних характеристик альгофлори при вивченні стану стійкості гідроекосистем (на прикладі оз. Задовже). *Acta Carpathica.* 2025. № 2 (44). С. 36–43. URL: https://doi.org/10.32782/2450-8640.2025.2.4
3. Barinova S.S., Bilous O.P., Tsarenko P.M. *Algal indication of water bodies in Ukraine: methods and perspectives.* Haifa, Kiev: University of Haifa Publisher, 2019. 367 p.
4. Barinova S., Niyatbekov T. Comparative Analysis of Diatom Algae Diversity in the Pamir Protected Lakes, Tajikistan. *International Journal of Advanced Research in Botany.* 2019. 5(2). 1–17. URL: https://doi.org/10.20431/2455-4316.0502001
5. Kumssa T., Bekele A. Phytoplankton composition and physico-chemical parameters study in water bodies of Abijata-Shalla Lakes National Park (ASLNP), Ethiopia. *Greener Journal of Biological Sciences*. 2014. 69–76.

6. Hambaryan L., Stepanyan L., Khachikyan T., Mamyan A., Azizyan L., Shahnazaryan G., Barinova S. Phytoplankton as an indicator of long-term changes in the aquatic ecosystem of Sevan National Park, Armenia, 2015–2019. *Nature Conservation Research.* 2025. 10. 13–30.
7. Kolesar S.E., McKnight D. M., Waters S.B. Late fall phytoplankton dynamics in three lakes, Rocky Mountain National Park. *Hydrobiologia*. 2002. 472(1). 249–263.
8. Sukhodolska I.L., Basaraba I.V. Seasonal Dynamics of Algal Flora of Lake Zasvitske (Rivne Region, Ukraine). *International Journal on Algae.* 2023. Vol. 25. Issue 4. P. 353–364. URL: https://doi.org/10.1615/InterJAlgae.v25.i4.40
9. Суходольська І.Л. Структура фітопланктону карстового озера Задовже (Україна). *Альгологія.* 2026. Вип. 36(1). С. 3–24. URL: https://doi.org/10.15407/alg36.01.003
10. Суходольська І.Л. Різноманіття фітопланктону водних екосистем природоохоронних територій (Нобельський національний природний парк). *Acta Carpathica.* 2026. № 1 (45). С. 36–44. URL: https://doi.org/10.32782/2450-8640.2026.1.4
11. Щербак В.І. Методи досліджень фітопланктону. У кн.: *Методичні основи гідробіологічних досліджень водних екосистем.* Київ, 2002. С. 41–48.
12. Guiry M.D., Guiry G.M. *Algae Base.* World-wide electron. publ. Nat. Univ. Ireland, Galway. 2025. URL: https://www.algaebase.org (дата звернення: 20.12.2025).

Дата першого надходження статті до видання: 28.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

УДК 502.1:004.415
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.46

ПРОСТОРОВИЙ АНАЛІЗ ЗАГРОЗ ЕКОСИСТЕМАМ НПП«БУЗЬКИЙ ГАРД» ЗАСОБАМИ ГІС-ТЕХНОЛОГІЙ

Сухомлін Л.В. (orcid.org/0009-0005-7971-8289),
Бакаленко В.А. (orcid.org/0009-0003-9099-6226)
[1]Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»
вул. Вадима Манька, 17, 61070, Харків
l.sukhomlin@khai.edu, v.a.bakalenko@student.khai.edu

У сучасній екологічній науці та заповідній справі особливої ваги набуває розробка інструментарію на основі ГІС-технологій для оперативного моніторингу та моделювання антропогенних загроз вразливим екосистемам. Стаття відображає науково-практичні напрацювання щодо удосконалення просторової візуалізації загроз на території Національного природного парку «Бузький Гард» – унікального резервату фіторізноманіття каньйону річки Південний Буг із локалізованими популяціями рослин, занесених до Червоної книги України. У роботі уточнено геопросторову локалізацію зон концентрації червонокнижних видів рослин. Стабільність цих екосистем безпосередньо залежить від сталості гідрологічного режиму прибережних територій. Потужним дестабілізуючим чинником, що загрожує незворотною перебудовою біотопів, є функціонування об'єктів гідроенергетики, зокрема проєктні моделі підвищення рівня води в Олександрівському водосховищі через добудову Ташлицької ГАЕС. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю доповнення верифікованими даними ГІС-моделей, здатних точно спрогнозувати масштаб деградації червонокнижних фітоценозів та оселищ Бернської конвенції внаслідок проєктного підняття рівня водосховища на 90 см. Просторове відображення цих наслідків посилює обґрунтованість критеріїв оцінки загроз для скельних і прибережних біотопів у реальному часі. Основними результатами дослідження є створення цілісної цифрової моделі рельєфу НПП «Бузький Гард» на основі даних SRTM і пунктів Державної геодезичної мережі. Змодельовано сценарії підняття рівня води до 16,9 м та 20,7 м із розробкою картосхеми зон потенційного затоплення і ризику для унікальних природних екосистем. Розроблені картографічні моделі дають можливість кількісно оцінити площі затоплення унікальних ландшафтів та історико-культурних локацій. Підвищують якість розробки об'єктивних експертних висновків, дозволяють оптимізувати функціональне зонування парку та підвищують науково-методичну базу для прийняття рішень щодо недопущення регіональної екологічної катастрофи. *Ключові слова:* ГІС-технології, НПП «Бузький Гард», антропогенні загрози, цифрове моделювання рельєфу, зони затоплення, екологічний моніторинг.

Spatial analysis of threats to the ecosystems of the "Buzkyi Gard" National Nature Park using GIS technologies. Sukhomlin L., Bakalenko V.

In modern environmental science and conservation, developing GIS-based tools for monitoring and modeling anthropogenic threats to vulnerable ecosystems is essential. This paper presents scientific and practical advancements in enhancing the spatial visualization of hazards within the Buzkyi Hard National Nature Park–a unique phytodiversity reserve in the Southern Bug River canyon, which harbors localized populations of plant species listed in the Red Data Book of Ukraine. The study refines the geospatial localization of concentration zones for these protected species, whose stability directly depends on the constancy of the riparian hydrological regime. The operation of hydropower facilities, specifically the design models for raising the water level in the Oleksandrivske Reservoir due to the Tashlyk Pumped-Storage Power Plant expansion, acts as a severe destabilizing factor threatening irreversible biotope restructuring. The study's relevance is driven by the urgent need to supplement GIS models with verified data capable of accurately predicting the scale of degradation of threatened phytocoenoses and Bern Convention habitats resulting from the projected 90 cm rise in the reservoir's water level. Spatial mapping of these consequences strengthens the validity of criteria used for real-time threat assessment of rocky and riparian biotopes. The primary results include creating a comprehensive digital elevation model (DEM) of the park based on SRTM data and the State Geodetic Network. Scenarios for water level rises up to 16,9 m and 20,7 m were modeled, resulting in a cartographic scheme of potential flooding zones and risks. The developed mapping models enable a quantitative assessment of inundated unique landscapes and historical-cultural locations, improve the quality of expert conclusions, optimize the park's functional zoning, and enhance the scientific and methodological framework for decision-making aimed at preventing a regional ecological disaster. *Key words:* GIS technologies, "Buzkyi Hard" NNP, anthropogenic threats, digital elevation modeling, flooding zones, environmental monitoring.

Постановка проблеми. У сучасних умовах посилення антропогенного тиску та глобальних кліматичних змін особливої гостроти набуває проблема збереження реліктових та ендемічних фітоценозів, зосереджених у межах об'єктів природно-заповідного фонду. Національний природний парк «Бузький Гард» [1] є унікальним резерватом фіторізноманіття занесених до Червоної книги України [2, 3]. Стабільність цих популяцій критично залежить від мікрокліматичних та едафічно-гідрологічних умов

© Сухомлін Л.В., Бакаленко В.А., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

прибережних екосистем. Штучна трансформація гідрологічного режиму річки Південний Буг, зумовлена функціонуванням об'єктів гідроенергетики та потенційним підняттям рівня води, виступає потужним дестабілізуючим чинником. Зміна гідродинамічних параметрів неминуче призводить до перебудови просторової структури екотопів, затоплення прибережної смуги та спричиняє повну деградацію ареалів унікальних видів рослин.

Традиційні підходи до екологічного моніторингу, що базуються на польових спостереженнях, не дають надоперативності та просторової безперервності даних. У зв'язку з цим виникає об'єктивна науково-практична потреба застосування просторового аналізу на основі ГІС- технологій, що дозволяє інтегрувати різнорідні геопросторові, гідрологічні та ботанічні дані в єдину аналітичну систему і спрогнозувати динаміку ареалів вразливої флори.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю розвитку науково-методичних засад просторового моделювання екологічних загроз для оптимізації стратегій збереження біорізноманіття та прийняття обґрунтованих управлінських рішень у сфері заповідної справи та розвитку громад.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Головна проблема полягає у відсутності деталізованих просторових моделей, які б дозволили комплексно оцінити та спрогнозувати реакцію ареалів червонокнижних рослин на потенційні зміни гідрологічного режиму річки. Незважаючи на наявність даних про видовий склад флори НПП «Бузький Гард» [3, 4], залишаються недостатньо вивченими питання просторового взаємозв'язку між гідрологічними параметрами та стабільністю розташування рідкісних видів. Крім того, існує науково-методична проблема об'єднання різнорідних геопросторових даних у єдину аналітичну систему, через що прогнозування екологічних наслідків від антропогенного втручання або зміни клімату має високий ступінь невизначеності, що ускладнює розробку дієвих заходів охорони та збереження природно-заповідного фонду.

Аналіз останніх досліджень і публікацій з проблематики загроз екосистемам із залученням сучасних засобів ГІС-технологій варто розподілити на декілька складових. По-перше, проблематика функціювання та розвитку природно-заповідного фонду України висвітлена у роботах відомих українських науковців, зокрема Л.Г. Руденко, Я. П. Дідуха, І.А. Акімова, В.А. Костюштна, Л.П. Вакаренка [5, 6], де детально досліджено унікальні фітоценотичні фонди. Фундаментальною працею є колективна робота вчених Інституту географії НАН України із середньомасштабного ландшафтно-екологічного картографування території України [5]. Питання гідроекологічного аспекту вивчалися у працях фахівців Інституту зоології ім. І.І. Шмальгаузена НАН України, Інституту гідробіології, а також у комплексних водогосподарських розрахунках таких, як «Плани управління річковими басейнами» [7]. Питанню формування стійких ландшафтів приділено увагу у працях М. Д. Гродзинського, Г. І. Денисика, І. С. Круглова, А. В. Мельника, В.М. Петліна, О. Гуцал [8, 9, 10]. Потужною залишається робота фахівців Національного природного парку «Бузький Гард» Легкого С. В., Овсієнко Я. В. [4]. Другим сучасним науковим пріоритетом є деджиталізація на основі використання геоінформаційних систем та дистанційного зондування Землі, що дає можливість моделювання природних процесів у нацпарках і активно розвивається у працях сучасних фахівців з геодезії, геоінформатики та ландшафтної екології. Як зазначає Медведєв В.В., карта – невідємний супутник моніторингу [11]. Про застосування ДЗЗ у гармонізації з ГІС ідеться у роботах Світличного О.О, Плотницького С.В., Свіддзинської Д.В., О.В. Бодні [12-14], які формують методи геоекологічних досліджнь. У працях науковців університету ім. В.Н. Каразіна досліджуються питання моніторингу НПП Слобожанщини [15]. Науковці наголошують, що побудова точних цифрових моделей рельєфу є базовим етапом для будь-якого гідрологічного моделювання. У міжнародній та вітчизняній практиці, і в даній роботі також, до цифрового моделювання залучаються відкриті глобальні дані радарної топографічної зйомки (SRTM), відкриті набори геопросторових даних [16], а для аналітичних обґрунтувань у роботі застосовувалися матеріали стаціонарних природоохоронних об'єктів України.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Попри наявність значної кількості публікацій щодо біорізноманіття НПП «Бузький Гард» з одного боку, та загальних методик ГІС-моделювання з іншого, у науковій літературі досі бракує інтегрованого підходу та не створено єдиної геоінформаційної моделі парку, яка б об'єднувала: високоточну гібридну ЦМР (SRTM + геодезична мережа); точні координати сучасних локацій червонокнижних видів; прогнозні межі затоплення під конкретні дискусійні гідрологічні відмітки (16,9 м та 20,7 м). Саме на вирішення цієї прогалини і спрямоване дане дослідження.

Наукова новизна полягає у розробленні комплексної моделі просторового аналізу впливу антропогенних чинників на зміни ареалів червонокнижних рослин Південного Бугу, яка інтегрує фактичні дані спостережень, цифрових моделей рельєфу і гідрологічних сценаріїв. Уперше для території НПП «Бузький Гард» створено геоінформаційні карти потенційних ризиків деградації ареалів унаслідок підняття рівня води.

Методологічне або загальнонаукове значення. Існує методичний розрив між гідрологічним сценарієм щодо моделювання підвищення рівня води Олександрівського водосховища та безпосереднім відображенням просторової структури розвитку

осередків екосистем заповідних зон парку. Нестача інтегрованих картографічних моделей обмежує можливість кількісно оцінити площі потенційного затоплення чи деградації критичних екотопів. Це створює високу невизначеність під час функціонального зонування території парку та унеможливлює розробку превентивних заходів охорони природи.

Викладення основного матеріалу. Одним із надважливіших етапів будь якої системи моніторингу є питання просторової верифікації об'єкту. Застосування ГІС під час просторової верифікації та реєстрації територій НПП «Бузький Гард» у Державному земельному кадастрі є критично важливою умовою для юридичного захисту заповідних земель і сталого планування територіальних громад. У даній роботі була проведена актуалізація просторової структури Національного природного парку «Бузький Гард», який було створеного Указом Президента України від 30 квітня 2009 року № 279 [17] з метою збереження, відтворення і раціонального використання унікальних природних та історико-культурних комплексів у басейні Південного Бугу. На момент формування парку його загальна площа складала 6138,13 га, з яких 2650,85 га було вилучено у землекористувачів та надано парку у постійне користування, 3487,28 га були включені до його складу без вилучення з поширенням природоохоронного режиму НПП [1]. В Указі чітко вказувалася площа виділеної території по районам та місцевим радам, але у зв'язку зі зміною адміністративно-територіального устрою України 2020 року, ці дані втратили актуальність. Нами була актуалізована площа території НПП згідно з чинним адмінустроєм та візуалізовані у тематичних шарах за допомогою ArcMap 10.8. До реформи 2020 року парк охоплював території 5 ліквідованих районів (Первомайського, Арбузинського, Братського, Вознесенського та Доманівського). На сьогодні Парк розташований у межах 2 адміністративних районів Миколаївської області: Первомайський і Вознесенський та 7 територіальних громад. За умовами нового адмінустрою територія НПП виявила високу територіальну концентрацію заповідного фонду, де понад 78% площі ядра парку та його розрахованої буферної зони, майже 5850 га, відповідно до ст.39 Закону України «Про ПЗФ» [18], зосереджено у межах чотирьох ключових територіальних громад: Благодатненській, Прибузькій, Олександрівській та Мигіївській (дані таблиці 1).

Така конфігурація зумовлює чітку спеціалізацію внутрішньої структури парку через Природоохоронні науково-дослідні відділення (ПНДВ) у межах НПП їх діє три: Мигіївське, Богданівське, Трикратське. Найбільше просторове навантаження припадає на Богданівське ПНДВ, із контролем понад 5200 га охоронних площ у Благодатненській та Прибузькій громадах. Головним викликом тут є екологічний контроль інтенсивного агровиробництва. Трикратське ПНДВ в Олександрівській ТГ фокусується на збереженні геоморфологічної унікальності Актовського каньйону в умовах промислового тиску. Мигіївське ПНДВ виконує роль головного рекреаційного хабу, де екологічні обмеження успішно трансформуються в економічні драйвери.

Впровадження актуалізованих меж у Комплексні плани просторового розвитку громад є критичним для виконання міжнародних зобов'язань України. Як ключовий об'єкт Смарагдової мережі (Emerald Network UA0000040) у межах Бернської конвенції, парк потребує уніфікованих містобудівних регламентів в усіх чотирьох ТГ. Крім того, ключовою вимогою положень Бернської конвенції, є вимога охороняти не лише самі види, але й їх природні оселища, що безпосередньо корелює із сучасним екосистемним підходом.

Беручи до уваги Методологію оцінювання територій, запропоновану Інститутом географії НАН України [5], з урахуванням ризиків руйнування ландшафтів, НПП розташований у межах Південно-Українського (Причорноморського) географічного округу, де загальна площа заповідних земель є катастрофічно малою. У випадку «Бузького Гарду» головною загрозою є промислове освоєння території (зокрема, діяльність Южно-Українського енергокомплексу, плани підняття рівня Олександрівського

Таблиця 1

Розподіл площі НПП «Бузький Гард» за територіальними громадами

Громада	Площа парку в громаді, км²	Площа Парку в громаді, га	% території відносно загальної площі Парку	% території громади, зайнятої Парком
Благодатненська	15.33	1533	24.97%	3.80%
Прибузька	11.32	1132	18.45%	3.78%
Олександрівська	11.28	1128	18.38%	3.91%
Мигіївська	10.15	1015	16.53%	2.59%
Первомайська	5.68	568	9.25%	2.01%
Южноукраїнська	4.36	436	7.10%	2.75%
Братська	3.27	327	5.33%	0.46%
Всього	61.38	6138	100%	–

водосховища та затоплення унікальних історико-ландшафтних зон).

Тому, окремим вагомим напрямом досліджень є безпосереднє картографування зон екологічного ризику. Моделювання критичних гідрологічних ситуацій, як планованих антропогенних, так і катастрофічних, (наприклад, наслідків руйнації гребель). Просторовий аналіз у ГІС дозволяє оцінити не просто площу втрачених земель, а ступінь фрагментації популяцій – тобто розриву єдиних ареалів на ізольовані дрібні ділянки, що веде до генетичного виродження вразливої флори. [1, 2, 3, 4]

Згідно з аналізом матеріалів проєкту ДП «НАЕК «Енергоатом» [20], винесених на процедуру оцінки впливу на довкілля, планується поетапне підвищення рівня води з +16 м до позначки +16,9 м, тоді як у проєктній документації також розглядається технічна можливість підняття рівня до +20,7м. Обидві відмітки істотно перевищують історично сформований природний рівень річки [7]. Крім того, підвищення рівня водосховища створює потенційний конфлікт із міжнародними зобов'язаннями України у сфері охорони біорізноманіття.

Для оцінки ризиків була сформована цифрова модель рельєфу (ЦМР). Джерелом її побудови слугували глобальні радарні дані екологічної місії Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) [6], а інтеграція даних точок висот державної геодезичної мережі, що дало змогу суттєво підвищити детальність і надійність геопросторового моделювання. Такий комплексний підхід дозволив нівелювати систематичні похибки притаманні первинним радарним матрицям висот (DEM) у зонах різких перепадів висот, і сформувати репрезентативну топографічну основу. На основі верифікованого масиву просторових даних за допомогою спеціалізованого інструмента інтерполяції Topo to Raster в середовищі ГІС було згенеровано кінцеву цифрову модель рельєфу (рис. 1).

Важливою складовою геоінформаційного моделювання стало залучення даних про просторове поширення рідкісних видів флори. Точкові спостереження, отримані з міжнародних баз даних і систематизовані в межах даного дослідження, були використані для побудови перспектив розширення заповідних зон. Для роботи використовувалися дані міжнародного відкритого ресурсу Global Biodiversity Information Facility (GBIF), який є глобальною інфраструктурою даних про біорізноманіття, а саме база даних GBIF точкових спостережень видів рослин занесених до Червоної книги України [21, 3, 4]. Для просторового аналізу також залучено дані з ресурсу Humanitarian Data Exchange (HDX) [22]. Застосування методів просторового аналізу дозволило визначити зони концентрації цінних видів, а також співвіднести їх із функціональним зонуванням національного парку та елементами рельєфу.

На завершальному етапі геоінформаційного моделювання було реалізовано сценарний підхід, що передбачає аналіз можливих змін території НПП «Бузький Гард» у разі підняття рівня води в річці Південний Буг. Шляхом просторового накладання моделі затоплення на базову модель території парку визначено ділянки потенційного ризику, зокрема ті, що збігаються з ареалами рідкісних видів рослин та екологічно цінними природними оселищами. Моделювання здійснювалося за двома сценаріями підвищення рівня води. Було використано цифрову модель рельєфу та інструментарій «Less Than Equal». У середовищі ArcMap 10.8 виконано просторову класифікацію ділянок із абсолютними відмітками рельєфу, нижчими за 16,9 м та 20,7 м відповідно. Також проведена оцінка площі додатково затоплених територій із застосуванням інструменту «Erase», це дало змогу отримати полігональні шари, що відображають лише приріст площі затоплення за кожним зі сценаріїв.

У разі реалізації Сценарію А (16,9 м) вплив на парк є мінімальним і локальним. Перехід до Сценарію Б (20,7 м) викликає критичний стрибок, де загальна площа затоплення по регіону зростає у 4,4 рази, тоді як площа втрат безпосередньо всередині НПП збільшується майже у 39 разів (див. табл. 2).

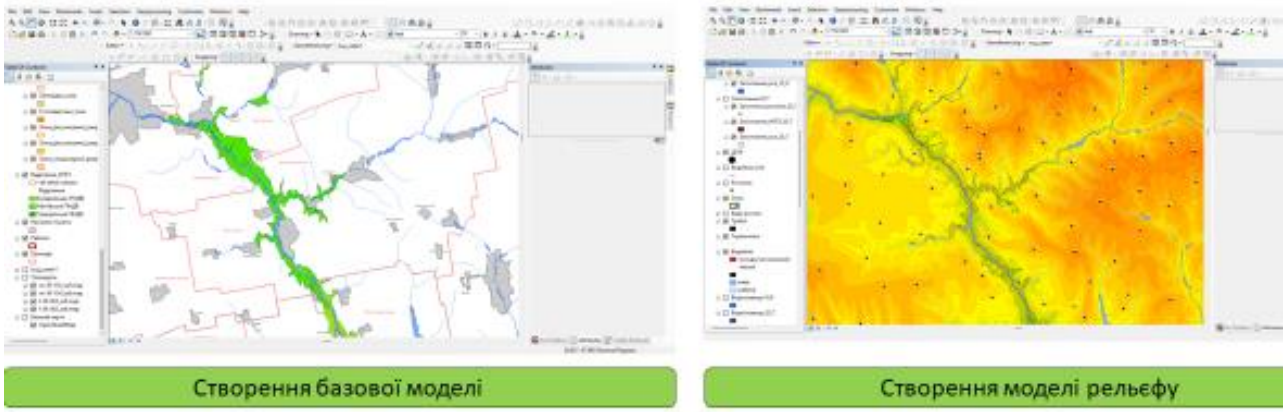


Рис. 1. Відображення базової та цифрової моделі рельєфу НПП «Бузький Гард»

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

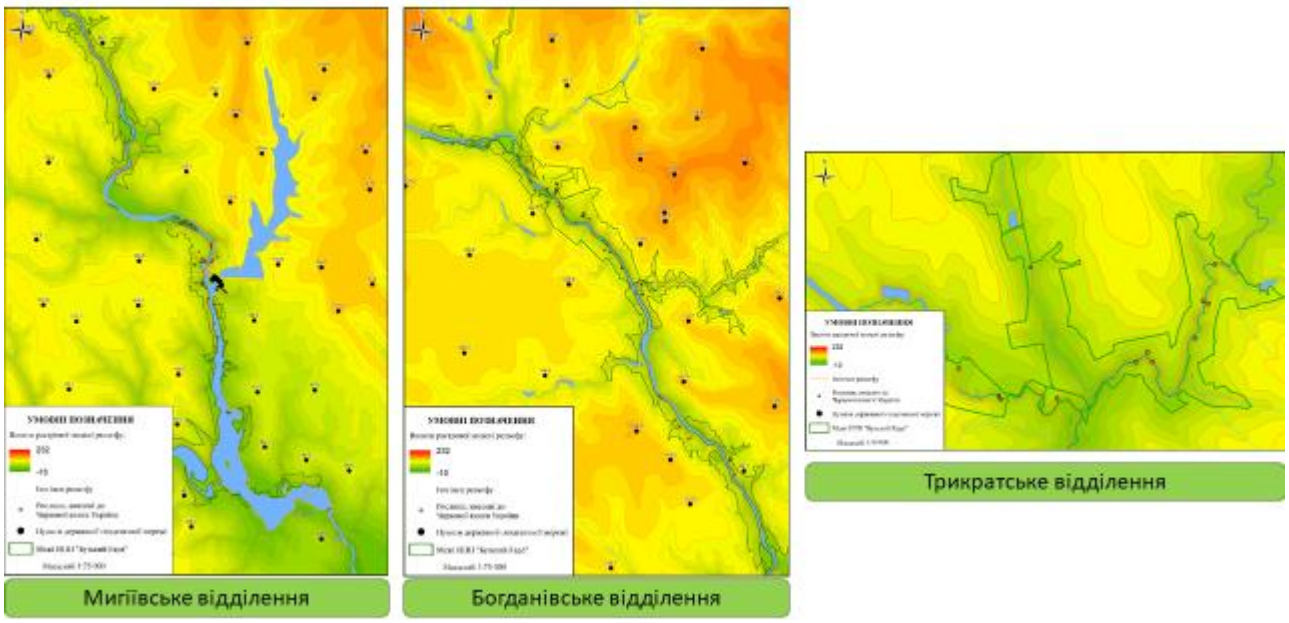


Рис. 2. Растрова модель рельєфу Мигіївського, Богданівського, Трикратського ПНДВ з відображенням ареалів концентрації червонокнижної флори.

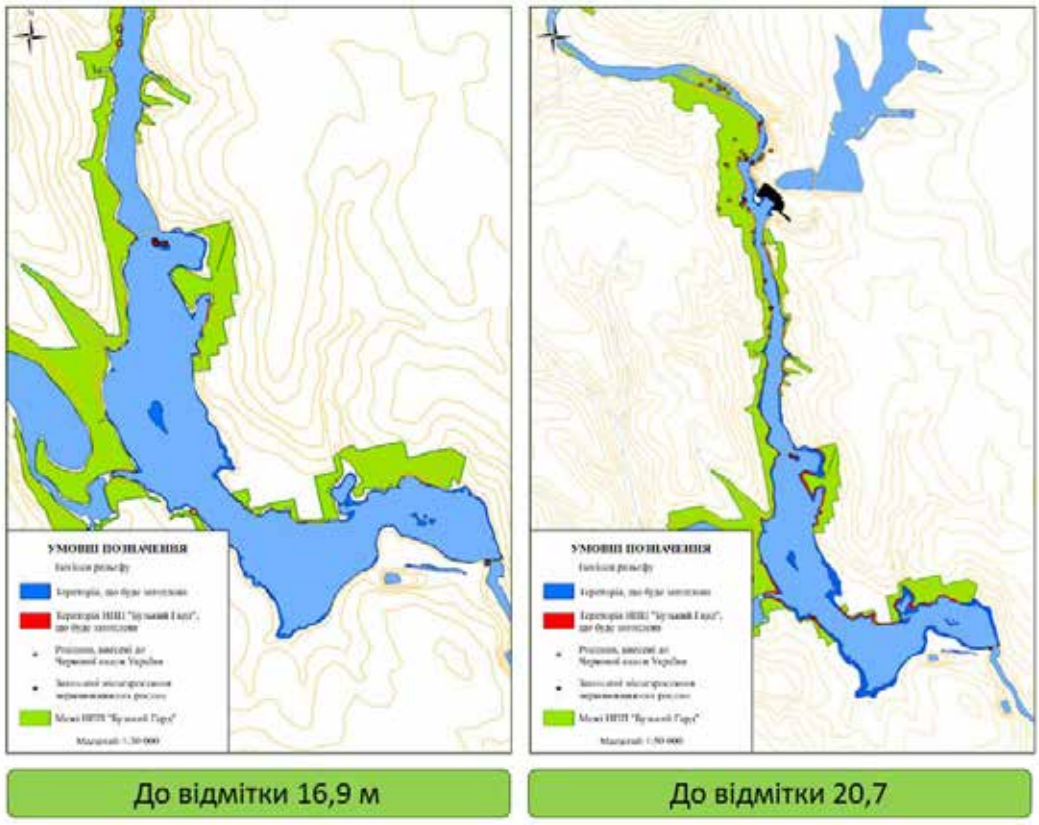


Рис. 3. ГІС моделювання сценаріїв підняття рівня води Олександрівського водосховища та затоплення унікальних історико-ландшафтних зон

Таблиця 2

Таблиця порівняльного аналізу сценаріїв затоплення

Сценарій підвищення рівня води	Загальна площа затоплення, км²	Площа затоплення в межах НПП, км²	Частка території НПП під затопленням (% від 61,38 км²)	Коефіцієнт акумуляції удару в парку
Сценарій А (16,9 м)	0.503	0.0095	0.015%	0.019
Сценарій Б (20,7 м)	2.224	0.3570	0.582%	0.161
Динаміка зростання	+342.1%	+3657.9%	Зростання у 38.8 раза	Зростання у 8.5 раза

Це свідчить про те, що саме рельєф парку приймає на себе основний гідрологічний удар при підвищенні позначки рівня води вище 17 метрів.

Втрата 35,7 гектарів річкової долини у Сценарії Б – це не просто втрата площі, а затоплення унікальних прибережних скельних екосистем, де зосереджені реліктові види флори та фауни Смарагдової мережі. Під воду повністю, або частково підуть унікальні літоральні ділянки та каньйоноподібні схили русла Південного Бугу. Підняття води до 20,7 м призведе до незворотної зміни гідрологічного режиму, де швидкі річкові пороги з епіцентром у Мигіївському та Богданівському відділеньннях перетворяться на водосховище озерного типу. Це знищить природну аерацію води та призведе до замулення гранітних каньйонів.

З метою оцінки впливу затоплення на червонокнижні види у межах НПП «Бузький Гард» було здійснено просторовий аналіз із використанням геоінформаційних методів. Для цього застосовано інструмент «Clip», за допомогою якого було сформовано шар точкових спостережень видів рослин, що просторово перекриваються з полігонами потенційного затоплення при різних сценаріях підвищення рівня води. У результаті проведеного аналізу встановлено, що при підвищенні рівня води відбувається затоплення територій, на яких зафіксовано зростання червонокнижних видів рослин, що свідчить про прямий ризик знищення їх природних оселищ. Факт неминучого повного або часткового знищення літоральних гранітних оголень, які є єдиними у світі місцями зростання (локалітетами) вузько локальних петрофільних ендеміків – Мерінгії бузької (Moehringia hypanica) та Смілки бузької (Silene hypanica). Ці види адаптовані виключно до специфічного мікроклімату тріщин вертикальних скель та каньйоноподібного рельєфу і підняття рівня води призведе до їхнього повного затоплення, незворотної ерозії субстрату та глобального вимирання видів у дикій природі. Стаття 20 Закону України «Про Червону книгу України» [2] прямо встановлює юридичну відповідальність за дії, що призводять до погіршення або знищення середовищ зростання видів, занесених до Червоної книги України. Таким чином, закон охоплює не лише випадки безпосереднього знищення окремих особин, але й будь-яке втручання, яке порушує екологічні умови їх існування. Закон не передбачає винятків для проєктів енергетичної або гідротехнічної інфраструктури, а отже реалізація рішень, що призводять до затоплення місцезростань охоронюваних видів, суперечить прямій забороні, встановленій законом. Така діяльність може бути кваліфікована як завдання шкоди об'єктам Червоної книги України незалежно від економічної доцільності або стратегічної важливості проєкту.

Головні висновки. За допомогою інструментів ArcMap 10.8 успішно верифіковано межі НПП «Бузький Гард» відповідно до нового адміністративно-територіального устрою України. Отримані ГІС-дані дозволяють оптимізувати внутрішнє управління, як у межах громад так і у межах трьох Природоохоронних науково-дослідних відділень. Інтеграція радарних даних SRTM із точковими висотними значеннями геодезичної мережі через алгоритм Topo to Raster дозволила нівелювати системні похибки в умовах складного каньйоноподібного рельєфу, створивши репрезентативну топографічну матрицю для просторового аналізу.

Гідрологічне моделювання довело, що підвищення рівня Олександрівського водосховища до позначки 16,9 м має локальний вплив. Натомість підняття до 20,7 м є екологічно катастрофічним, де площа затоплення всередині парку критично зростає у 38,8 рази. Це призведе до незворотного знищення літоральних біотопів, а задекларовані розробниками компенсаційні заходи у вигляді штучного перенесення (релокації) петрофітної флори є абсолютно недієвими, адже специфіка біології Moehringia hypanica унеможливлює її приживлюваність на інших ділянках без збереження унікального гідротермічного режиму гранітного каньйону, що робить консервацію єдиним науково виправданим методом захисту.

Перспективи використання результатів дослідження. Матеріали дослідження можуть слугувати основою для створення пошарової ГІС-карти точних координат зростання червонокнижної флори в межах Богданівського, Мигіївського та Трикратського ПНДВ. Ця матриця може бути інтегрована в систему ДЗК. Результати просторового моделювання та розраховані межі охоронної зони можуть бути інтегровані у Комплексні плани просторового розвитку територій семи громад.

Сформована цифрова модель червонокнижних видів є готовою науково-правовою базою для представників Міндовкілля та екологічної громадськості під час проходження процедури Оцінки впливу на довкілля.

Матеріали ГІС-моделювання дозволяють екологічній інспекції та адміністрації НПП провести точний розрахунок потенційних збитків на основі діючих Постанов Кабміну щодо обчислення розміру шкоди, заподіяної природно-заповідному фонду. Наявність точної площі затоплення скельних масивів дозволяє математично довести мільярдні фінансові збитки для держави,

Література

1. Положення про національний природний парк «Бузький Гард» : наказ Міндовкілля України від 31 лип. 2020 № 111. URL: https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/04/Polozhennya-Buzkyj-Gard.pdf. (дата звернення: 16.01.2026).
2. Про Червону книгу України : Закон України від 07 лют. 2002 № 3055-III. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/3055-14 (дата звернення: 16.12.2025).
3. Про затвердження переліків видів рослин та грибів, що заносяться до Червоної книги України (рослинний світ), та видів рослин та грибів, що виключені з Червоної книги України (рослинний світ): наказ Міндовкілля від 15 лют. 2021 № 111. – URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0370-21#Text (дата звернення: 16.12.2025).
4. Легкий С.В., Овсієнко Я. В. Степові екосистеми національного природного парку «Бузький Гард»: сучасний стан, біорізноманіття та загрози сукцесійних змін. *Степ: досвід збереження* : зб. матеріалів другого наук-практ. семінару. Чернівці : Друк Арт, 2025. С. 35 – 37.
5. Методологія і практика оцінювання території України для заповідання: монографія ; за ред. Л.Г. Руденка. Київ : Наукова думка, 2020. 246 с.
6. Костюшин В.А. Деякі сучасні проблеми функціювання та розвитку природно-заповідного фонду україни. *Матеріали робочої групи з питань природно-заповідного фонду*. Випуск 1 ; за ред. Ю. Ю. Овчинникова. Київ: Комітет Верховної Ради України з питань екологічної політики та природокористування. 2021. С. 96-100.
7. Плани управління річковими басейнами (ПУРБ). веб-сайт. URL: www/eu4waterdata.eu/ (дата звернення 16.01.2026).
8. Гродзинський М.Д. Ландшафтна екологія: підручник. Київ : Знання., 2014. 550 с.
9. Петлін В. М. Проблеми ландшафтно-картографічної інтерпретації просторової мінливості даних. *Український географічний журнал*. 2018. № 3 (103). С. 16–20. DOI: https://doi.org/10.15407/ugz2018.03.016.
10. Гуцал О., Василенко Н., Бовсуновський Є. Методичні рекомендації щодо оголошення заказників, пам'яток природи та заповідних урочищ для удосконалення формування екологічної мережі України. Київ : Видавництво Ліра-К, 2023. 54 с.
11. Багатоспектральне космічне сканування в системі моніторингу ґрунтів: монографія. Трускавецький С.Р., Биндич Т.Ю., Вяткін К.В., та ін. Харків : 2018. 280 с.
12. Основи геоінформатики : навчальний посібник / Світличний О.О., Плотницький С.В. та ін. ; за ред. Світличного О.О. Суми : ВТД «Університетська книга», 2006. 295 с.
13. Свідзинська Д.В. Методи геоекологічних досліджень: геоінформаційний пратикум на основі відкритої ГІС SAGA: навчальний посібник. Київ : Логос. 2014. 402 с.
14. Бодня О. В., Олійников І. А., Овчаренко А. Ю. Використання ГІС-технологій у ландшафтних дослідженнях. *ГІС та заповідні території* : матеріали науково-методичного семінару 2015 р., НПП «Слобожанський». Харків : «Мадрид», 2016. С. 25-30.
15. Залюбовська О., Овчаренко А., Черваньов І. Ландшафтні дослідження: від парадигми через ГІС-технологію до моніторингу (на прикладі території НПП "Слобожанський"). *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*, 2023, випуск 59. С. 110-124. DOI: https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-09.
16. Watkins D. 30-Meter SRTM Elevation Data Downloader. URL: https://dwtkns.com/srtm30m/ (last accessed 18.01.2026).
17. Про створення національного природного парку «Бузький Гард» : Указ Президента України від 30 квіт. 2009 № 279/2009. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/279/2009 (дата звернення 16.01.2026).
18. Про природно-заповідний фонд України : Закон України від 16 черв. 1992 № 2456-XII. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/2456-12 (дата звернення 16.01.2026).
19. Конвенція про охорону дикої флори та фауни і природних середовищ існування в Європі : Конвенція від 19 вер. 1979. Берн. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_032#Text (дата звернення 11.12.2025).
20. Заява Національного екологічного центру України щодо неприпустимості реалізації планованої діяльності по добудові Ташлицької ГАЕС та підняттю рівня Олександрівського водосховища. *Національного екологічного центру України* : веб-сайт. URL: https://necu.org.ua/zayava-naczionalnogo-ekologichnogo-czentru-ukrayiny-shhodo-neprypustymosti-realizacziyi-planovanoyi-diyalnosti-po-dobudovi-tashlyczkoyi-gaes (дата звернення 16.12.2025).
21. Vasyliuk O. та ін. Records of protected plant and fungi species in Ukraine : набір даних (occurrence dataset). Версія 1.5 / Ukrainian Nature Conservation Group (NGO). 2023. DOI: https://10.15468/vmf5ye
22. Humanitarian Data Exchange (HDX) (shapefile, *.shp) : OCHA Centre for Humanitarian Data. URL: https://data.humdata.org/ (last accessed 18.01.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 16.07.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

УДК 551.515.2:656.61
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.47

ОЦІНКА МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ УМОВ СУДНОВИХ АВАРІЙ У ПІВНІЧНІЙ АТЛАНТИЦІ ЗА ДАНИМИ РЕАНАЛІЗУ ERA5

Семергей-Чумаченко А.Б. (orcid.org/0000-0001-8718-4073),
Шепель В.В. (orcid.org/0000-0002-3734-3731)
Одеський національний університет імені І.І. Мечникова
вул. Всеволода Змієнко, 2, 65082, м. Одеса
asemergey2016@gmail.com, victoriya.shepel@gmail.com

У статті представлено методологічний підхід до кількісної оцінки взаємозв'язку між метеорологічними умовами та аварійністю морських суден в Північній Атлантиці на основі поєднання даних реаналізу ERA5 та архівних записів про реальні морські інциденти. Актуальність дослідження зумовлена зростаючою частотою екстремальних метеорологічних явищ у регіоні на тлі глобального потепління та відсутністю систематичних підходів до кількісного зіставлення архівних даних про аварії із даними реаналізу. Дослідження базується на даних реаналізу ERA5 з часовою дискретністю 6 годин для акваторії 20–70°N, 80°W–10°E за 2014–2019 рр., а також на структурованому датасеті Naval_v2, що містить задокументовані суднові аварії із координатами, датою та типом інциденту. Після просторово-часової фільтрації для аналізу відібрано 21 випадок аварії, кожному з яких методом найближчого сусіда зіставлено відповідні значення швидкості вітру та тиску ERA5. Випадки розподілені на дві категорії – пов'язані з погодними умовами (n=9) та інші типи аварій (n=12) – для порівняльного аналізу з використанням t-тесту Уелча. Виявлено односпрямовану тенденцію до вищих значень швидкості вітру (6,61 проти 5,29 м/с) та нижчого тиску (1011,5 проти 1012,4 гПа) для погодозалежних аварій, проте різниця не досягла статистичної значущості (p=0,500 та p=0,860 відповідно), що пояснюється малим обсягом вибірки та переважно прибережним і портовим розташуванням більшості інцидентів (86%). Встановлено, що широкі категорії типу аварії мають обмежену придатність як індикатор погодної зумовленості інциденту. Результати підкреслюють цінність підходу для подальших досліджень із розширеною вибіркою даних. *Ключові слова*: зміна клімату, Північна Атлантика, штормова активність, реаналіз ERA5, зміна клімату, безпека судноплавства, морські інциденти.

Assessment of Meteorological Conditions of Ship Accidents in the North Atlantic Based on ERA5 Reanalysis Data. Semerhei-Chumachenko A., Shepel V.

This paper presents a methodological approach to the quantitative assessment of the relationship between meteorological conditions and vessel accident rates in the North Atlantic, based on the combination of ERA5 reanalysis data and archival records of real maritime incidents. The relevance of the study is driven by the increasing frequency of extreme meteorological events in the region amid global warming, and by the lack of systematic approaches to quantitatively matching archival accident data with reanalysis data. The study is based on ERA5 reanalysis data at 6-hour temporal resolution for the area 20–70°N, 80°W–10°E over 2014–2019, as well as on the structured Naval_v2 dataset, which contains documented vessel accidents with coordinates, date, and incident type. After spatiotemporal filtering, 21 accident cases were selected for analysis, each matched via the nearest-neighbor method to the corresponding ERA5 wind speed and pressure values. The cases were divided into two categories – weather-related (n=9) and other accident types (n=12) – for comparative analysis using Welch's t-test. A unidirectional trend was found toward higher wind speed values (6.61 vs. 5.29 m/s) and lower pressure (1011.5 vs. 1012.4 hPa) for weather-related accidents, though the difference did not reach statistical significance (p=0.500 and p=0.860), which is explained by the small sample size and the predominantly coastal and port location of most incidents (86%). It was established that broad accident-type categories have limited suitability as an indicator of weather-related causation. The results underscore the value of the proposed approach for further studies with an expanded data sample. *Key words*: climate change, North Atlantic, storm activity, ERA5 reanalysis, maritime safety, marine incidents.

Постановка проблеми. Зміна клімату суттєво трансформує характер атмосферної циркуляції у Північній Атлантиці, зумовлюючи зміщення штормових треків, зростання інтенсивності позатропічних циклонів та збільшення повторюваності екстремальних вітрових і хвильових явищ. Оскільки Північна Атлантика є одним із найбільш завантажених морських коридорів світу, зміни режиму небезпечних гідрометеорологічних умов у цьому регіоні мають безпосередній вплив на безпеку мореплавства. Втім, попри значну кількість досліджень штормової активності та окремо статистики морських аварій, комплексний аналіз, який би кількісно оцінював внесок кліматичних змін штормового режиму у формування ризику суднових інцидентів, залишається недостатньо розробленим – наявні бази даних

© Семергей-Чумаченко А.Б., Шепель В.В., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

про аварії рідко супроводжуються верифікованими метеорологічними параметрами на момент події.

Використання даних реаналізу ERA5, які забезпечують просторово й часово узгоджені ряди метеопараметрів за багаторічний період, дозволяє подолати це обмеження шляхом систематичного зіставлення архівних записів про реальні інциденти зі штормовими індексами. Таким чином, актуальною є проблема кількісної оцінки взаємозв'язку між змінами клімату та рівнем аварійності суднового транспорту у Північній Атлантиці, вирішення якої сформує наукову основу для вдосконалення систем прогнозу морських ризиків.

Актуальність дослідження визначається зростаючою частотою та інтенсивністю екстремальних гідрометеорологічних явищ у Північній Атлантиці на тлі глобальної зміни клімату, що потребує наукового переосмислення підходів до оцінки морських ризиків. Судноплавство залишається основним способом міжконтинентального вантажоперевезення, а регіон дослідження – один із найінтенсивніших і водночас найнебезпечніших маршрутів через високу повторюваність позатропічних циклонів, тому навіть незначне зміщення штормових трендів здатне суттєво вплинути на безпеку мореплавства та економічні втрати галузі.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження виконано згідно з цілями та завданнями, що сформульовані в науково-дослідних роботах кафедри метеорології та кліматології факультету гідрометеорології і екології Одеського Національного Університету імені І.І. Мечникова (ФГМіЕ ОНУ ім. І.І. Мечникова) «Модернізація методів прогнозу небезпечних явищ погоди для різних регіонів України» (№ ДР 0125U000647, 2025-2029 рр.).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Комплексний звіт Всесвітньої метеорологічної організації за 2025 р. вказує, що період 2015–2025 рр. є найтеплішим 11-річчям за всю історію спостережень, а сам 2025 рік став другим або третім найтеплішим роком з показником близько +1,43 °C відносно доіндустріального рівня [1]. Уперше до звіту включено новий ключовий кліматичний індикатор – дисбаланс енергії Землі, який засвідчив рекордне накопичення тепла в кліматичній системі за 2001–2025 рр., причому близько 90% надлишкової енергії акумулюється Світовим океаном [1]. Це підтверджує інтенсифікацію енергообміну між океаном та атмосферою, що безпосередньо впливає на штормогенез та умови судноплавства у Північній Атлантиці.

Власні попередні дослідження авторів встановили тенденції до потепління північно-західної частини Північної Атлантики (регіони Гренландії та Ньюфаундленду), зсув фаз Північноатлантичного коливання (NAO) та пов'язану з ним перебудову ядра позатропічної штормової зони і зміщення осі струминної течії на північ [2; 3].

Дослідження Wang et al. на основі ансамблевого реаналізу XX століття виявило статистично значущі довгострокові тренди та низькочастотну мінливість активності позатропічних циклонів у Північній Атлантиці, підтверджуючи посилення штормової активності в окремі періоди спостережень [4]. Огляд Bricheno et al. узагальнює сучасні прогнозні та ретроспективні оцінки змін штормового та хвильового режиму для акваторії Великої Британії та Ірландії, вказуючи на зростання повторюваності екстремальних штормових епізодів в останні десятиліття [5]. У свою чергу, дослідження Poo & Yang акцентує на практичних наслідках кліматичної мінливості для функціонування судноплавних мереж, наголошуючи на необхідності підвищення їхньої стійкості до штормових ризиків [6].

Класичне дослідження Guedes Soares et al. присвячене безпосередньо частоті аварій суден за важких погодних умов саме у Північній Атлантиці, встановлюючи зв'язок між географічним розподілом аварій та зонами підвищеної хвильової небезпеки [9]. Пізніша робота Zhang et al. розвиває цей підхід на глобальному матеріалі, зіставляючи місця аварій суден із розподілом хвильової небезпеки за океанічним хвильовим атласом та виокремлюючи роль зибу (swell) як самостійного фактора ризику, що є методологічним орієнтиром для запропонованого в цій статті підходу поєднання архівних записів про інциденти з кліматичними індексами реаналізу [10].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Попри значний доробок у вивченні окремо кліматичних трендів Північної Атлантики та окремо факторів суднової аварійності, комплексні дослідження, які кількісно пов'язують довгострокові зміни штормового режиму (на основі реаналізу ERA5) з архівними даними про реальні морські інциденти, залишаються нечисленними, що й зумовлює актуальність цієї роботи.

Мета дослідження полягає у кількісній оцінці взаємозв'язку між гідрометеорологічними умовами (швидкістю вітру, атмосферним тиском) та рівнем аварійності суднового транспорту в Північній Атлантиці на основі просторово-часового зіставлення даних реаналізу ERA5 з архівними записами про реальні морські інциденти.

Новизна полягає у вперше здійсненому для регіону Північної Атлантики точковому просторово-часовому зіставленні реальних архівних записів про суднові аварії (Naval_v2) з відповідними метеорологічними умовами за даними реаналізу ERA5 на момент кожного конкретного інциденту. На відміну від попередніх досліджень, які розглядали аварійність суден та кліматичні характеристики штормів переважно окремо або на основі агрегованих/усереднених показників, у роботі застосовано метод найближчого сусіда для прямого зіставлення координат і дати кожної аварії з локальними значеннями

швидкості вітру та атмосферного тиску, що дало змогу здійснити кількісне порівняння гідрометеорологічних умов між категоріями аварій різного походження (погодозалежні та інші) за допомогою статистичного тестування (t-тест Уелча), а не лише якісно констатувати можливий зв'язок, як це здійснювалося в частині попередніх досліджень

Методологічне значення дослідження полягає у розробленні та апробації підходу до просторово-часового зіставлення даних реаналізу ERA5 з архівними записами про реальні морські інциденти, що поєднує точкову прив'язку координат і дат аварій до відповідних метеорологічних умов (швидкість вітру, атмосферний тиск) на момент події методом найближчого сусіда з подальшим порівняльним статистичним аналізом (t-тест Уелча) між категоріями аварій різного походження. Запропонований підхід дозволяє перейти від якісної констатації можливого зв'язку між погодними умовами та аварійністю суден до кількісної оцінки цього зв'язку на рівні конкретних задокументованих випадків. Розроблена методика може бути використана як універсальний інструмент для аналогічних досліджень в інших акваторіях Світового океану за умови розширення обсягу вибірки, а також для вдосконалення систем прогнозування морських ризиків та підтримки прийняття рішень у сфері безпеки судноплавства.

Загальнонаукове значення дослідження полягає дослідження полягає у поглибленні розуміння механізмів взаємозв'язку між кліматичними змінами та безпекою критично важливої транспортної інфраструктури Світового океану.

Викладення основного матеріалу. Дослідження базується на двох масивах даних за період 2014–2019 рр. Кліматологічну основу становлять дані реаналізу ERA5 (Copernicus Climate Data Store) [7] – зональна та меридіональна компоненти вітру на висоті 10 м (u10, v10) та середній тиск на рівні моря (msl), отримані з часовою дискретністю 6 годин (00, 06, 12, 18 UTC) для акваторії Північної Атлантики в межах 20–70°N, 80°W–10°E. Просторова роздільна здатність становить 0,25°×0,25° (201×361 вузлів сітки), загальний обсяг часового ряду – 8764 термінів спостережень без пропусків.

Дані про реальні морські інциденти отримано з відкритого структурованого датасету Naval_v2 [8] (Kaklis et al., 2021), який містить 249 задокументованих випадків аварій суден за 1983–2020 рр. на основі офіційних звітів морських розслідувань (NTSB, MAIB, DMAIB та ін.), включно з координатами місця події, датою, типом аварії та супутніми гідрометеорологічними параметрами. Після фільтрації за просторовими межами досліджуваного регіону та часовим періодом, що відповідає доступним даним ERA5 (2014–2019 рр.), для аналізу було відібрано 21 випадок аварії. Кожному інциденту було зіставлено найближчі за просторовою локацією та часом значення швидкості вітру й атмосферного тиску з масиву ERA5 методом найближчого сусіда (nearest neighbor).

Для подальшого аналізу випадки аварій було розподілено на дві категорії за характером первинної причини: «пов'язані з погодними умовами» (Sinking Heavy Weather, Heavy-weather, Flooding, Capsizing, Capsizing and sinking, Capsizing/Listing; n=9) та «інші» (Collision, Grounding, Fire, тощо; n=12), що дозволило порівняти гідрометеорологічні умови між групами аварій різної природи.

Аналіз 21 випадку суднових аварій у Північній Атлантиці за 2014–2019 рр. виявив тенденцію до вищих значень швидкості вітру для аварій, класифікованих як пов'язані з погодними умовами (6,61 ± 4,75 м/с; n=9), порівняно з іншими типами аварій (5,29 ± 3,70 м/с; n=12), проте різниця не є статистично значущою (t=0,691; p=0,500) за результатами t-тесту Уелча. Аналогічне порівняння за середнім тиском на рівні моря не виявило змістовної різниці між групами (1011,5 та 1012,4 гПа відповідно). Відсутність статистичної значущості пояснюється обмеженим обсягом вибірки, високою гетерогенністю типів інцидентів у межах кожної категорії та переважно прибережним/портовим характером більшості задокументованих аварій (рис. 1), що знижує чутливість до штормових індексів відкритого океану.

Просторовий розподіл проаналізованих інцидентів (Рис. 1) демонструє виразну неоднорідність географічного поширення аварій у межах досліджуваного регіону. Абсолютна більшість випадків (18 з 21) зосереджена в прибережній зоні східної частини Північної Атлантики – вздовж узбережжя Великої Британії, Ірландії, Франції та Піренейського півострова, а також поблизу Канарських островів.

Лише один випадок зафіксовано у відкритій акваторії західної частини регіону (судно Carnival Pride поблизу Балтимора) та один – у крайній південно-західній частині досліджуваної акваторії, з максимальним зафіксованим значенням швидкості вітру (17,4 м/с), що відповідає випадку загибелі судна El Faro під час проходження тропічного циклону Хоакін у жовтні 2015 р.

Кольорове кодування точок за швидкістю вітру ERA5 на момент аварії наочно демонструє, що переважна більшість прибережних інцидентів відбувалася за відносно спокійних гідрометеорологічних умов (2–6 м/с), тоді як підвищені значення швидкості вітру (>9 м/с) зафіксовано лише для поодиноких випадків. Такий просторовий патерн опосередковано пояснює відсутність статистично значущої різниці між категоріями аварій (підрозділ вище): переважання портових і навколопортових інцидентів, спричинених здебільшого навігаційними та експлуатаційними факторами, а не штормовими умовами, знижує загальну чутливість вибірки до штормових індексів ERA5.

Порівняльний аналіз гідрометеорологічних умов між двома категоріями суднових аварій (рис. 2) виявив односпрямовану, проте статистично незна-

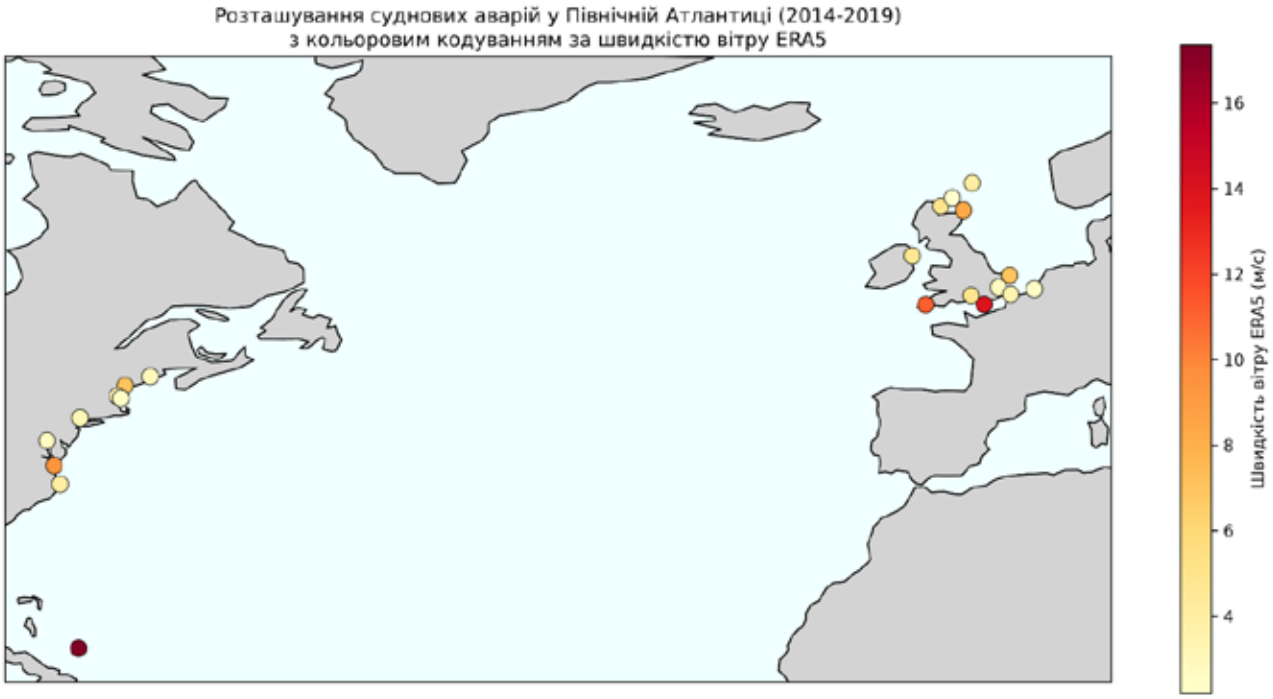


Рис. 1. Розташування суднових аварій у Північній Атлантиці (2014–2019) з кольоровим кодуванням за швидкістю вітру ERA5

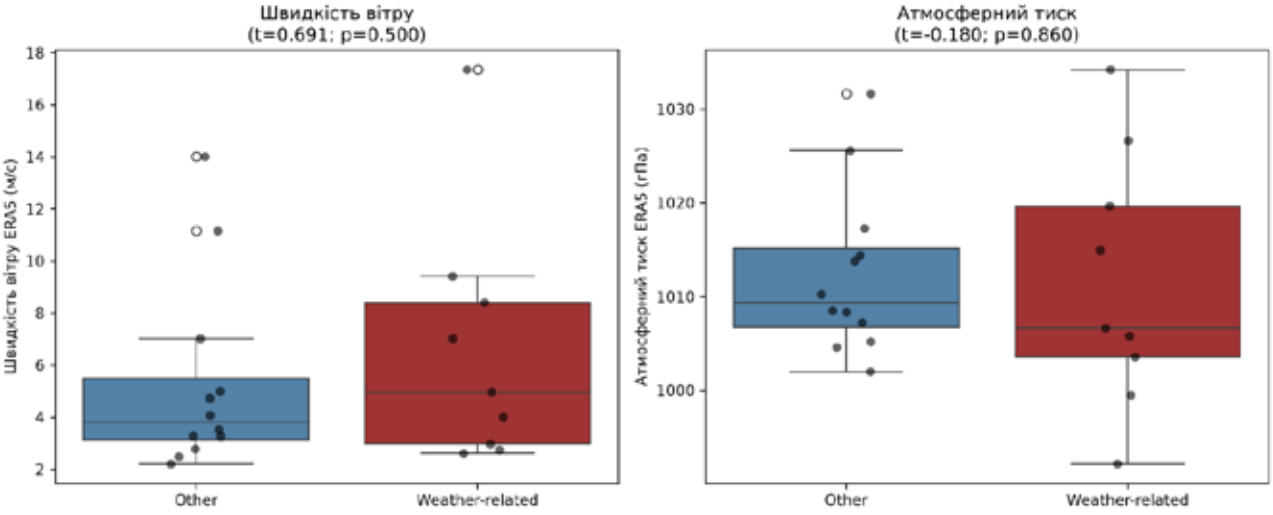


Рис. 2. Розподіл швидкості вітру (ліворуч) та атмосферного тиску на рівні моря (праворуч) за даними ERA5 для двох категорій суднових аварій: пов'язаних з погодними умовами (n=9) та інших типів (n=12)

чущу тенденцію за обома досліджуваними параметрами. Медіанна швидкість вітру ERA5 для аварій, класифікованих як пов'язані з погодними умовами, була вищою порівняно з іншими типами інцидентів, а розподіл значень у цій категорії характеризувався ширшим міжквартильним розмахом (3,0–8,4 м/с проти 3,2–5,5 м/с), що включав екстремальне значення 17,4 м/с (випадок El Faro). Різниця середніх значень не досягла статистичної значущості (t=0,691; p=0,500).

Аналогічна картина спостерігається для атмосферного тиску на рівні моря: попри дещо нижче медіанне значення в категорії погодозалежних аварій (1006,3 гПа проти 1009,4 гПа), загальний розкид значень у цій групі виявився суттєво ширшим – від екстремально низького (985 гПа, також відповідає випадку El Faro) до аномально високого (1034 гПа), тоді як розподіл тиску для «інших» аварій був компактнішим (1002–1025 гПа). Різниця середніх значень тиску також не є статистично значущою (t=-0,180; p=0,860).

Виявлений широкий розкид значень у категорії погодозалежних аварій, попри її менший обсяг (n=9), свідчить про високу гетерогенність первинних причин у межах цієї групи: поряд із випадками, безпосередньо зумовленими екстремальними штормовими умовами (Sinking Heavy Weather), до категорії потрапляють й інциденти (Capsizing, Flooding), що могли статися за відносно спокійної погоди внаслідок конструктивних або експлуатаційних факторів. Це вказує на обмежену придатність широких категоріальних класифікацій типу аварії як самостійного індикатора погодної зумовленості інциденту та підкреслює необхідність точкового, а не групового аналізу зв'язку між гідрометеорологічними умовами та кожним конкретним випадком.

Отримані результати частково узгоджуються, а частково контрастують із висновками попередніх досліджень, розглянутих у огляді літератури. З одного боку, виявлений напрямок тенденції (вищі значення швидкості вітру та нижчий тиск для погодозалежних аварій) відповідає загальній логіці класичних робіт Guedes Soares et al. та Zhang et al., які встановили зв'язок між зонами підвищеної хвильової небезпеки та географічним розподілом суднових аварій у Північній Атлантиці [9; 10]. З іншого боку, відсутність статистичної значущості в нашому дослідженні контрастує з переконливішими результатами цих робіт, що можна пояснити принциповою відмінністю методологічних підходів: згадані дослідження оперували значно більшими вибірками (десятки років спостережень) та здебільшого фокусувалися на аваріях у відкритому океані, тоді як 86% випадків (18 з 21) у нашій вибірці зосереджені в прибережній та портовій зоні (Рис. 1), де аварійність частіше зумовлена навігаційними, технічними та людськими факторами, а не безпосередньо штормом.

Це узгоджується з висновком [6] щодо необхідності диференційованого підходу до оцінки кліматичних ризиків судноплавних мереж залежно від типу маршруту та інфраструктури: транзитні коридори в океані та прибережні/портові зони мають принципово різну чутливість до штормів. У контексті виявлених у нашому огляді літератури довгострокових трендів штормової активності Північної Атлантики [4; 5] отримані результати не заперечують гіпотезу про зростання кліматично зумовленого ризику для судноплавства, але вказують на те, що цей зв'язок, ймовірно, проявляється нерівномірно – переважно для трансатлантичних рейсів та суден, що потрапляють у зону дії інтенсивних позатропічних циклонів (як у випадку El Faro), тоді як для портових інцидентів превалюють інші фактори ризику.

Окремої уваги заслуговує методологічне обмеження, пов'язане з характером зіставлення даних: у дослідженні використано точкові значення метеопараметрів ERA5 на момент фіксації аварії, тоді як реальний розвиток морської катастрофи (особливо типу «Sinking Heavy Weather» чи «Capsizing») часто є результатом кумулятивного впливу штормових умов протягом попередніх годин або навіть діб, а не миттєвого стану атмосфери. Це може призводити до недооцінки фактичного внеску погодного фактору та частково пояснює слабкість виявленого статистичного зв'язку.

Обмеження дослідження. Ключовим обмеженням є малий обсяг вибірки (n=21), зумовлений тим, що використаний датасет Naval_v2 [8], попри високу якість документування окремих випадків, не є спеціалізованою базою даних для регіону Північної Атлантики і охоплює лише обмежену кількість інцидентів у заданих просторово-часових межах. Додатковим обмеженням є висока гетерогенність категорії «типу аварії» – об'єднання в одну групу різних за механізмом подій (від раптового затоплення під час шторму до поступового накопичення несправностей) знижує статистичну потужність порівняння.

Головні висновки.

1. Встановлено односпрямовану, проте статистично незначущу тенденцію до вищих значень швидкості вітру (6,61 проти 5,29 м/с; t=0,691; p=0,500) та нижчого атмосферного тиску (1011,5 проти 1012,4 гПа; t=-0,180; p=0,860) для аварій, класифікованих як пов'язані з погодними умовами, порівняно з іншими типами інцидентів.

2. Виявлено, що переважна більшість проаналізованих випадків (86%) зосереджена в прибережній та портовій зоні регіону, що є ключовим фактором, який обмежує чутливість вибірки до штормових індексів відкритого океану та пояснює відсутність статистичної значущості отриманих відмінностей.

3. Апробований у роботі методологічний підхід – поєднання даних реаналізу ERA5 з точковою прив'язкою координат і дат реальних інцидентів – довів свою придатність для кількісної оцінки кліматично зумовлених ризиків судноплавства.

4. Отримані результати підкреслюють необхідність розмежування трансатлантичних та прибережних інцидентів при подальшому вивченні впливу зміни клімату на безпеку судноплавства.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати вказують на доцільність розширення вибірки за рахунок залучення додаткових джерел даних про морські інциденти (USCG MISLE, EMSA EMCIP) для підвищення статистичної потужності аналізу, а також перехід від точкового зіставлення до аналізу часових рядів штормових індексів за 24–72 години, що передують аварії. Перспективним є також роздільний аналіз для відкритоокеанських та прибережних/портових інцидентів, що дозволить коректніше ізолювати внесок власне кліматичного фактора від навігаційних та експлуатаційних причин аварійності.

Література

1. State of the Global Climate 2025. Geneva: World Meteorological Organization, 2026. WMO-No. 1391. URL: https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate/state-of-global-climate-2025
2. Семергей-Чумаченко А. Б., Шегель В. В. Changes in meteorological characteristics of the North Atlantic under global warming. Український гідрометеорологічний журнал. 2025. № 34-35. С. 18–31. DOI: https://doi.org/10.32782/uhj.34-35.2025.02
3. Семергей-Чумаченко А. Б., Шепель В. В. Вплив підвищення температури повітря та океану у Північній Атлантиці на трансокеанічне судноплавство. Екологічні науки. 2025. № 6(63). С. 282–289. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.6-63.44
4. Wang X.L., Feng Y., Compo G.P., Swail V.R., Zwiers F.W., Allan R.J., Sardeshmukh P.D. Trends and low frequency variability of extra-tropical cyclone activity in the ensemble of twentieth century reanalysis. *Climate Dynamics*. 2013. Vol. 40 (11-12). P. 2775–2800. DOI: https://doi.org/10.1007/s00382-012-1450-9
5. Bricheno L.M., Woolf D., Valiente N.G., Makrygianni N., Chowdhury P., Timmermans B. Climate change impacts on storms and waves relevant to the UK and Ireland. *MCCIP Science Review*. 2025. 24 p. DOI: https://doi.org/10.14465/2025.reu09.str
6. Ching-Pong Poo M., Yang Z. Optimising the resilience of shipping networks to climate vulnerability. Maritime Policy & Management. 2024. Vol. 51, № 1. P. 15–34. DOI: https://doi.org/10.1080/03088839.2022.2094488
7. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., et al. The ERA5 global reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. Vol. 146. P. 1999–2049. DOI: https://doi.org/10.1002/qj.3803 (Last accessed: 05.07.2026)
8. Kaklis D., Varlamis I., Sardianos C., et al. Shipping Accidents Dataset (Naval / Naval_v2): Data-Driven Directions for Assessing Accident's Impact and Improving Safety Onboard. Data. 2021. Vol. 6, № 12. Art. 129. DOI: https://doi.org/10.3390/data6120129. Dataset: Zenodo. URL: https://zenodo.org/records/5592999 (Last accessed: 25.06.2026)
9. Guedes Soares C., Bitner-Gregersen E.M., Antão P. Analysis of the frequency of ship accidents under severe North Atlantic weather conditions. Design and Operation for Abnormal Conditions II. 2001. Vol. 2. P. 221–230.
10. Zhang M., et al. Global ship accidents and ocean swell-related sea states. Natural Hazards and Earth System Sciences. 2017. Vol. 17. P. 2041–2051. DOI: https://doi.org/10.5194/nhess-17-2041-2017

Дата першого надходження статті до видання: 16.07.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

ТЕОРЕТИЧНА ЕКОЛОГІЯ

УДК 504.06:005.35:657.37:622+669(477)
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.48

ОЦІНЮВАННЯ ПОВНОТИ ТА ЯКОСТІ РОЗКРИТТЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ У ESG-ЗВІТНОСТІ ПІДПРИЄМСТВ ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНОГО КОМПЛЕКСУ

Кірейцева Г.В. (orcid.org/0000-0002-1055-1784),
Хоменко С.В. (orcid.org/0009-0002-7463-7867)
Державний університет «Житомирська політехніка»
вул. Чуднівська, 103, 10005, м. Житомир
gef_kgv@ztu.edu.ua, org_hsv@ztu.edu.ua

Стаття присвячена розробленню методичного підходу до комплексного оцінювання повноти та якості розкриття екологічної інформації у корпоративній звітності підприємств гірничо-металургійного комплексу відповідно до Європейських стандартів звітності зі сталого розвитку (ESRS E1 – E5). Актуальність дослідження зумовлена посиленням вимог до корпоративної прозорості внаслідок ухвалення Директиви (ЄС) 2022/2464 (CSRD), значним екологічним впливом гірничо-металургійного виробництва та обмеженою порівнюваністю наявних ESG-даних. Для проведення контент-аналізу сформовано систему з 30 індикаторів, об'єднаних у п'ять тематичних блоків відповідно до стандартів ESRS E1 «Зміна клімату», E2 «Забруднення», E3 «Водні та морські ресурси», E4 «Біорізноманіття та екосистеми» та E5 «Використання ресурсів і циркулярна економіка». Для кількісної оцінки розроблено шестирівневу кумулятивну шкалу від 0 до 5 балів, яка розмежовує відсутність інформації, декларативне розкриття та повне кількісне й верифіковане представлення даних. Інформаційну основу дослідження становили дев'ять інтегрованих річних звітів, звітів зі сталого розвитку та кліматичних звітів компаній Metinvest, Ferrexpo та Interpipe за 2022 – 2024 рр., за якими здійснено 270 індикаторних оцінювань. За результатами розраховано часткові індекси за кожним стандартом ESRS та інтегральний індекс екологічної прозорості. Найвище значення ІЕП у 2024 р. отримав Interpipe (68,4 %), друге місце посіла Ferrexpo (65,6 %), показник Metinvest становив 56,6 %. Жоден зі звітів не досяг рівня понад 80 %. Найповніше розкритими виявилися блоки ESRS E1 та ESRS E5 (по 68,9 %), найменш повно ESRS E4 (49,6 %), що свідчить про недостатнє висвітлення впливів на біорізноманіття та екосистеми. Отримані результати можуть використовуватися підприємствами, аудиторами, інвесторами й органами публічного управління для порівняльної оцінки якості екологічних розкриттів та підготовки даних до незалежного підтвердження. *Ключові слова:* екологічна безпека, зміна клімату, ESG-звітність, корпоративна екологічна прозорість, гірничо-металургійний комплекс, декарбонізація, циркулярна економіка.

Assessment of the completeness and quality of environmental information disclosure in the ESG reporting of mining and metallurgical enterprises. Kireitseva H., Khomenko S.

The article is dedicated to developing a methodological approach for the comprehensive assessment of the completeness and quality of environmental information disclosed in the corporate reporting of mining and metallurgical enterprises in accordance with the European Sustainability Reporting Standards (ESRS E1–E5). The relevance of the study is driven by tightening corporate transparency requirements following the adoption of Directive (EU) 2022/2464 (CSRD), the significant environmental impact of mining and metallurgical production, and the limited comparability of existing ESG data. For the content analysis, a system of 30 indicators was developed, grouped into five thematic blocks corresponding to ESRS E1 "Climate Change," E2 "Pollution," E3 "Water and Marine Resources," E4 "Biodiversity and Ecosystems," and E5 "Resource Use and Circular Economy." A six-level cumulative scoring scale from 0 to 5 points was designed to distinguish the absence of information, declarative disclosure, and full, quantified, and verified data presentation. The study drew on nine integrated annual reports, sustainability reports, and climate reports of Metinvest, Ferrexpo, and Interpipe for 2022 – 2024, resulting in 270 indicator-level assessments. Partial indices were calculated for each ESRS standard along with an integral index of environmental transparency (IET). In 2024, Interpipe achieved the highest IET value (68.4 %), followed by Ferrexpo (65.6 %), while Metinvest scored 56.6 %; none of the analyzed reports reached a level above 80 %. The most fully disclosed blocks were ESRS E1 and ESRS E5 (68.9 % each), while ESRS E4 showed the lowest score (49.6 %), indicating insufficient disclosure of impacts on biodiversity and ecosystems. The obtained results can be used by enterprises, auditors, investors, and public authorities for comparative assessment of the quality of environmental disclosures and preparation of data for independent assurance. *Key words:* environmental safety, climate change, ESG reporting, corporate environmental transparency, mining and metallurgical complex, decarbonization, circular economy.

© Кірейцева Г.В., Хоменко С.В., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. Посилення глобальних екологічних викликів, зростання антропогенного навантаження на довкілля та необхідність переходу до низьковуглецевої моделі економіки зумовлюють необхідність зміни підходів до оцінювання діяльності підприємств. Поряд із традиційними фінансово-економічними результатами дедалі більшого значення набуває інформація про вплив суб'єктів господарювання на клімат, атмосферне повітря, водні ресурси, земельні та біологічні ресурси, а також про утворення відходів і ефективність використання сировини. У цьому контексті ESG-звітність поступово перетворюється з інструменту корпоративної комунікації на важливу складову системи екологічного управління підприємством [1].

Розкриття екологічної інформації в ESG-звітах дає змогу ідентифікувати основні джерела негативного впливу на довкілля, оцінювати масштаби використання природних ресурсів, контролювати динаміку викидів і скидів, відстежувати утворення та поводження з відходами, визначати екологічні ризики й оцінювати результативність природоохоронних заходів. Наявність систематизованих екологічних даних також створює інформаційну основу для встановлення кількісних цілей, формування програм декарбонізації, підвищення ресурсоефективності та впровадження принципів циркулярної економіки. Отже, якісна ESG-звітність має забезпечувати зв'язок між задекларованими екологічними зобов'язаннями підприємства, управлінськими рішеннями та фактичними результатами зменшення навантаження на довкілля.

Актуальність дослідження. Зростання масштабів кліматичних змін, виснаження природних ресурсів, забруднення довкілля та втрата біорізноманіття посилюють суспільний і регуляторний запит на екологічну відповідальність суб'єктів господарювання. За таких умов корпоративна екологічна прозорість стає важливою складовою системи управління підприємством. Особливо актуальним забезпечення екологічної прозорості є для підприємств гірничо-металургійного комплексу, діяльність яких супроводжується значними викидами парникових газів, високим рівнем споживання енергії, води та мінеральної сировини, утворенням великотоннажних промислових відходів, вилученням і порушенням земель, трансформацією природних ландшафтів та потенційним негативним впливом на біорізноманіття й екосистеми. Функціонування підприємств гірничо-металургійного комплексу охоплює взаємопов'язані процеси видобування та збагачення сировини, виробництва металургійної продукції й забезпечення допоміжних операцій, кожен із яких формує специфічні впливи на довкілля. Це зумовлює необхідність комплексного розкриття екологічної інформації за всіма суттєвими напрямами діяльності підприємств. За даними World Steel Association, у 2024 р. світове виробництво сталі становило 1,886 млрд т, тоді як сукупні викиди парникових газів сталеливарного сектору оцінювалися приблизно у 4,1 млрд т CO_2-екв. Виробництво однієї тонни сталі супроводжувалося в середньому утворенням 2,18 т CO_2-екв., а частка галузі у глобальних антропогенних викидах парникових газів становила 7 – 8 %. При цьому близько 75 % викидів припадало безпосередньо на виробничі процеси. Середня енергоємність виробництва у 2024 р. дорівнювала 20,95 ГДж на тонну сирої сталі [2]. За оцінкою Міжнародного енергетичного агентства, чорна металургія посідає перше місце серед галузей важкої промисловості за обсягами викидів CO_2 та друге за споживанням енергії [3]. Наведені дані свідчать, що декарбонізація гірничо-металургійного виробництва потребує не лише технологічної модернізації, а й створення прозорої, порівнюваної та верифікованої системи екологічного обліку і звітування.

Крім того, прийняття Директиви (ЄС) 2022/2464 щодо корпоративної звітності зі сталого розвитку (CSRD) та Європейських стандартів звітності зі сталого розвитку (ESRS) сформувало нові вимоги до структури, змісту, порівнюваності, цифрового подання і незалежного підтвердження інформації про сталий розвиток [5, 6.7]. Для українських підприємств, які співпрацюють із партнерами з ЄС, надання стандартизованої ESG-інформації стає важливою умовою подальшої співпраці, залучення фінансування та збереження позицій на європейському ринку. Особливо це стосується підприємств гірничо-металургійного сектору, продукція яких характеризується значними викидами парникових газів під час виробництва та підпадає під дію механізму вуглецевого коригування імпорту ЄС.

Водночас оприлюднення ESG-звіту не гарантує повноти й достовірності екологічної інформації. Звіти можуть містити описові положення та позитивні результати без належного кількісного обґрунтування. Підприємства не завжди зазначають методики розрахунку показників, межі звітування, базові роки, перелік охоплених об'єктів і наявність незалежного підтвердження. Вибіркове висвітлення інформації створює ризик грінвошингу. Ще однією проблемою є також обмежена порівнюваність екологічних показників. Підприємства використовують різні межі обліку, методики розрахунку, одиниці вимірювання та базові роки. Це ускладнює об'єктивне порівняння рівня їхньої екологічної прозорості.

Отже, значний екологічний вплив гірничо-металургійного виробництва, посилення вимог до корпоративної звітності та недостатня порівнюваність ESG-даних зумовлюють необхідність розроблення методичного підходу до кількісного оцінювання повноти, якості, порівнюваності й достовірності екологічних розкриттів.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Авторський доробок пов'язаний із розв'язанням

наукового завдання щодо розвитку методичного забезпечення оцінювання корпоративної екологічної прозорості в умовах переходу від добровільного нефінансового звітування до стандартизованих розкриттів за CSRD та ESRS. Запропонована система індикаторів конкретизує положення ESRS E1 – E5 для підприємств гірничо-металургійного комплексу та поєднує оцінювання тематичної повноти з аналізом кількісної визначеності, методологічної обґрунтованості, порівнюваності й підтвердженості даних.

Практична спрямованість дослідження полягає у створенні інструменту, придатного для внутрішньої діагностики готовності підприємств до звітування за ESRS, виявлення прогалин у системах екологічного обліку та визначення пріоритетів удосконалення ESG-звітів. Отримані результати можуть бути використані підприємствами, аудиторами, інвесторами й органами публічного управління для порівняльної оцінки якості екологічних розкриттів і підготовки даних до незалежного підтвердження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання формування, стандартизації та оцінювання якості ESG-звітності розглядаються в низці сучасних наукових досліджень. Зокрема, О. Олійник і Д. Захаров дослідили теоретичні та практичні аспекти ESG-звітності, визначивши її роль у забезпеченні корпоративної прозорості та врахуванні інформаційних потреб заінтересованих сторін [8]. Є. Польовик і С. Король проаналізували особливості нефінансового звітування у промисловому секторі та обґрунтували необхідність уніфікації його структури і показників [9]. Д. Селецька запропонувала підхід до формування екологічної складової ESG-звітності українських підприємств відповідно до стандартів GRI [10]. А. Озеран і Р. Коршикова оцінили повноту висвітлення екологічних питань у нефінансових звітах державних підприємств України відповідно до вимог ESRS та виявили найбільші інформаційні прогалини у розкритті даних про забруднення, біорізноманіття і циркулярну економіку [11]. F. E. Mezzanotte дослідив принцип подвійної суттєвості як основу європейської моделі звітності зі сталого розвитку [12], а F. A. Almaqtari та співавтори встановили взаємозв'язок між якістю екологічних розкриттів, корпоративним управлінням та ESG-результативністю підприємств [13]. A. Janik та співавтори систематизували основні прояви грінвошингу у звітності зі сталого розвитку й обґрунтували доцільність застосування контент-аналізу для оцінювання достовірності корпоративних екологічних заяв [14]. Водночас комплексне кількісне оцінювання повноти та якості розкриття екологічної інформації українськими підприємствами гірничо-металургійного комплексу одночасно за всіма стандартами ESRS E1 – E5 залишається недостатньо опрацьованим, що визначає спрямованість цього дослідження.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття та новизна. Незважаючи на активний розвиток досліджень у сфері ESG-звітності, недостатньо вирішеним залишається питання комплексного кількісного оцінювання екологічної інформації, яку оприлюднюють українські підприємства. Наявні підходи переважно зосереджені на аналізі нормативних вимог, перевірці наявності окремих показників або оцінюванні певних напрямів екологічної діяльності. Водночас бракує методики, яка охоплювала б усі екологічні стандарти ESRS E1 – E5 та одночасно враховувала повноту розкриття, кількісну визначеність показників, прозорість методик їх розрахунку, межі звітування, порівнюваність у часі, зв'язок із установленими цілями та наявність незалежного підтвердження.

Наукова новизна дослідження полягає в розробленні та апробації методичного підходу до комплексного оцінювання повноти і якості екологічної інформації у корпоративній звітності підприємств гірничо-металургійного комплексу. Запропонований підхід поєднує 30 індикаторів, сформованих відповідно до вимог ESRS E1 – E5, шестирівневу шкалу оцінювання від 0 до 5 балів, часткові індекси за кожним екологічним стандартом та інтегральний індекс екологічної прозорості.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічне значення дослідження полягає в розробленні комплексного підходу до оцінювання екологічної інформації, оприлюдненої у корпоративній звітності підприємств гірничо-металургійного комплексу. На відміну від методик, які передбачають лише встановлення факту наявності певного показника, запропонований підхід дає змогу одночасно оцінити повноту та змістову якість його розкриття відповідно до вимог ESRS E1 – E5. Інформаційну основу дослідження становили дев'ять інтегрованих річних звітів, звітів зі сталого та відповідального розвитку, кліматичних звітів і документів із незалежного підтвердження даних Metinvest, Ferrexpo та Interpipe за 2022 – 2024 рр [15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24]. Для проведення контент-аналізу сформовано систему з 30 індикаторів, об'єднаних у п'ять тематичних блоків (таблиця 1).

Представлені індикатори використано як уніфіковані одиниці контент-аналізу корпоративної звітності. Для кожного з них оцінювалися наявність інформації, рівень її кількісної визначеності, методологічна прозорість, порівнюваність у часі та зовнішня верифікованість. Для переведення результатів контент-аналізу в кількісну форму розроблено шестирівневу шкалу оцінювання від 0 до 5 балів. Критерії присвоєння балів наведено в табл. 2.

Шкала має кумулятивний характер де кожний наступний рівень передбачає виконання ознак попереднього рівня та наявність додаткових характеристик якості. Якщо інформація відповідала ознакам декількох рівнів, присвоювався найвищий бал, усі критерії якого були підтверджені змістом звіту. За відсутності достатнього підтвердження застосову-

Таблиця 1

Система індикаторів оцінювання екологічної інформації

Блок	Код	Індикатор оцінювання	Інформація, яку шукаємо у звіті
ESRS E1	E1.1	Кліматична політика	Політика, стратегія або план кліматичного переходу
	E1.2	Кліматичні цілі	Кількісна ціль, базовий і цільовий роки
	E1.3	Викиди Scope 1	Загальний обсяг, т CO_2-екв.
	E1.4	Викиди Scope 2	показники розраховані ринковим методом та/або методом територіального розподілу
	E1.5	Викиди Scope 3	Загальний обсяг і категорії викидів
	E1.6	Вуглецева інтенсивність	Викиди на тонну продукції або одиницю доходу
	E1.7	Енергоспоживання	Загальний обсяг і частка відновлюваної енергії
	E1.8	Декарбонізація	Заходи, ресурси та фактичні результати
ESRS E2	E2.1	Політика запобігання забрудненню	Політика, цілі та програми
	E2.2	Викиди в атмосферне повітря	NO_x, SO_x, пил та інші речовини
	E2.3	Забруднення вод	Обсяги й склад скидів, очищення стічних вод
	E2.4	Небезпечні речовини	Використання, утворення або вивільнення
	E2.5	Екологічні інциденти	Аварії, перевищення, штрафи та заходи реагування
ESRS E3	E3.1	Управління водними ресурсами	Політика та оцінювання водних ризиків
	E3.2	Забір води	Загальний обсяг і розподіл за джерелами
	E3.3	Споживання води	Загальний і питомий показники
	E3.4	Оборотне водокористування	Повторно використана та повернена вода
	E3.5	Території водного стресу	Об’єкти, ризики та заходи з підвищення ефективності використання водних ресурсів
ESRS E4	E4.1	Політика щодо біорізноманіття	Зобов’язання, політика або програма
	E4.2	Розташування виробничих об’єктів	Наближеність до природоохоронних територій
	E4.3	Вплив на екосистеми	Види, оселища, екосистемні зміни
	E4.4	Порушені землі	Загальна площа порушених територій
	E4.5	Рекультивація	Площа відновлених і рекультивованих земель
	E4.6	Результати природоохоронних заходів	Кількісні цілі та фактичні результати
ESRS E5	E5.1	Циркулярна економіка	Політика ресурсоефективності
	E5.2	Використання матеріалів	Первинна і вторинна сировина, металобрухт
	E5.3	Утворення відходів	Загальний обсяг, види та класи небезпеки
	E5.4	Поводження з відходами	Перероблення, відновлення і видалення
	E5.5	Великотоннажні відходи	Відвали, хвости збагачення, шлаки
	E5.6	Цілі ресурсоефективності	Цілі, заходи та результати скорочення відходів

Джерело: розроблено автором.

валася нижча оцінка. Для індикаторів, які за своєю природою є переважно якісними, зокрема наявності екологічної політики або системи управління, кількісна визначеність трактувалася як наявність вимірюваних цілей, строків реалізації, ресурсного забезпечення та показників виконання. Для індикаторів, що безпосередньо характеризують екологічне навантаження, обов’язковими ознаками вищих рівнів оцінювання були числові значення, одиниці вимірювання, звітні межі та динаміка.

На основі отриманих балів розраховано часткові індекси за кожним стандартом ESRS E1 – E5 та інтегральний індекс екологічної прозорості. Дана методика дає змогу виявляти інформаційні прогалини, відокремлювати декларативні твердження від кількісно підтверджених результатів і визначати напрями, за якими звітність потребує вдосконалення. Запропонований підхід можна застосовувати для підприємств інших галузей, змінивши перелік індикаторів відповідно до особливостей їхньої діяльності. Аналітична матриця дає змогу оцінити готовність підприємств до звітування за ESRS, виявити прогалини в екологічних даних і підготувати їх до незалежного підтвердження. Розраховані індекси характеризують якість розкриття інформації, а не фактичну екологічну результативність підприємств.

Виклад основного матеріалу. Проведений аналіз корпоративної звітності Metinvest, Ferrexpo та Interpipe засвідчив відмінності у форматах подання екологічної інформації, застосованих стандартах, межах звітування та підходах до незалежного підтвердження даних. Metinvest оприлюднює інтегровані річні звіти, Ferrexpo поєднує річну звітність зі звітами про відповідальний бізнес і зміну клімату, а Interpipe подає екологічну інформацію у річних звітах та окремих документах щодо викидів парникових газів. Усі досліджувані корпоративні групи розкривають інформацію про кліматичні впливи, енергоспоживання, використання води, утворення відходів і природоохоронні заходи. Водночас повнота охоплення виробничих об'єктів, деталізація показників, тривалість динамічних рядів і наявність методологічних пояснень суттєво різняться. Найбільш структурованими є дані про викиди парникових газів і використання ресурсів, тоді як інформація про забруднення та біорізноманіття часто має описовий або фрагментарний характер.

Кліматичний блок ESRS E1 «Зміна клімату» є найбільш розвиненою складовою звітності. Підприємства наводять дані про прямі й непрямі викиди парникових газів, енергоспоживання, заходи з енергоефективності та цілі декарбонізації. Ferrexpo розкриває Scope 1 і Scope 2, кліматичні цілі та план переходу до продукції з нижчими викидами. Metinvest подає абсолютні й питомі показники, однак неповне розкриття Scope 2 і Scope 3 та зміни організаційних меж обмежують порівнюваність. Найвище значення блоку отримав Interpipe у 2024 р. завдяки розкриттю Scope 1 – 3, методики розрахунку й незалежному підтвердженню частини даних.

Інформація про забруднення за ESRS E2 «Забруднення» представлена менш системно. Основну увагу приділено викидам в атмосферне повітря, зокрема оксидам азоту, діоксиду сірки та пилу. Дані про скиди, забруднення ґрунтів, небезпечні речовини та штрафи розкриваються неповно. Спільними недоліками є обмежена деталізація за виробничими об'єктами, недостатнє пояснення методик вимірювання і причин зміни показників.

У звітах за ESRS E3 «Водні та морські ресурси» наведено відомості про водозабір, водоспоживання, повторне використання води та оборотне водопостачання. Ferrexpo описує джерела водопостачання й оборотні системи, Metinvest подає консолідовані показники водозабору, а Interpipe повідомляє про повторне використання води та модернізацію водогосподарської інфраструктури. Основними прогалинами є недостатня деталізація даних за територіями, неповне розкриття впливу на водні об'єкти та обмежена інформація про діяльність у зонах водного стресу.

Блок ESRS E4 «Біорізноманіття та екосистеми» виявився найменш повно представленим. Підприємства повідомляють про рекультивацію земель, озеленення, відновлення порушених ділянок і моніторинг біорізноманіття, проте переважно без достатньої просторової та кількісної деталізації. Недостатньо розкрито розташування об'єктів поблизу природоохоронних територій, впливи на види й оселища, площі порушених і відновлених земель, кількісні цілі та результати природоохоронних заходів.

Підприємства розкривають дані про використання сировини, утворення та перероблення відходів, застосування вторинних матеріалів і поводження з відвалами, хвостосховищами та шлаками. Interpipe детально висвітлює використання металобрухту, Metinvest поводження з гірничими, металургійними й коксохімічними відходами, Ferrexpo відходи видобування та збагачення руди. Для кількісного порівняння опрацьовано дев'ять корпоративних звітів за 2022 – 2024 рр. За 30 індикаторами ESRS E1 – E5 здійснено 270 оцінювань. Деталізовані бали за кожною корпоративною групою наведено в табл. 3 – 65

Таблиця 2

Шкала оцінювання повноти та якості розкриття екологічної інформації

Бал	Рівень розкриття	Критерії оцінювання
0	Інформація відсутня	Відомості за індикатором у проаналізованих документах не виявлено
1	Декларативне розкриття	Наявна лише загальна згадка про екологічний аспект, намір або зобов'язання без опису конкретних заходів і результатів
2	Часткове якісне розкриття	Наведено опис політики, заходів або результатів, але відсутні кількісні показники, чіткі межі та можливість оцінити динаміку
3	Кількісне розкриття	Наведено кількісні дані та одиниці вимірювання, однак відсутні окремі елементи: методика, базовий рік, динаміка, межі обліку або пояснення змін
4	Розширене розкриття	Інформація містить кількісні показники, динаміку, межі обліку, методологічні пояснення, цілі або результати заходів
5	Повне верифіковане розкриття	Розкриття є кількісним, порівнюваним і методологічно прозорим, пов'язане з цілями та результатами, а дані охоплені незалежним зовнішнім підтвердженням

Джерело: розроблено автором.

Таблиця 3

Результати оцінювання екологічних розкриттів Metinvest

Код	Індикатор	2022 р.	2023 р.	2024 р.
E1.1	Кліматична політика та план переходу	3	3	3
E1.2	Кількісні кліматичні цілі, базовий і цільовий роки	3	3	3
E1.3	Викиди Scope 1	4	4	4
E1.4	Викиди Scope 2	0	0	0
E1.5	Викиди Scope 3	0	0	0
E1.6	Сукупні викиди ПГ та інтенсивність	3	3	3
E1.7	Енергоспоживання та частка відновлюваної енергії	4	4	4
E1.8	Заходи, ресурси й результати декарбонізації	3	3	4
E2.1	Політика та заходи щодо забруднення	3	3	4
E2.2	Викиди забруднювальних речовин в атмосферу	4	4	4
E2.3	Скиди та стічні води	3	3	3
E2.4	Небезпечні речовини	2	2	2
E2.5	Інциденти, перевищення та штрафи	2	2	2
E3.1	Політика, впливи й ризики щодо води	3	3	3
E3.2	Забір води за джерелами	4	4	4
E3.3	Споживання води та інтенсивність	4	4	4
E3.4	Скидання, повторне використання та оборотне водопостачання	4	4	4
E3.5	Об'єкти у зонах водного стресу та заходи	1	1	1
E4.1	Політика щодо біорізноманіття	2	2	2
E4.2	Об'єкти поблизу природоохоронних територій	1	1	1
E4.3	Впливи на види, оселища й екосистеми	2	2	2
E4.4	Площа порушених земель	3	3	3
E4.5	Площа рекультивованих, відновлених або озеленених земель	3	3	3
E4.6	Цілі, заходи й результати щодо біорізноманіття	2	2	2
E5.1	Політика ресурсоефективності та циркулярності	3	3	3
E5.2	Використані матеріали, вторинна сировина та металобрухт	2	2	2
E5.3	Утворення відходів за видами та небезпечністю	4	4	4
E5.4	Повторне використання, перероблення, відновлення та видалення	4	4	4
E5.5	Відвали, хвостосховища та шлаки	3	3	3
E5.6	Кількісні цілі та результати щодо ресурсів і відходів	3	3	3

Джерело: розраховано автором за результатами контент-аналізу корпоративної звітності [15-17].

Аналізуючи дані таблиці варто відмітити, що оцінки Metinvest у 2022 – 2023 рр. залишалися стабільними, а у 2024 р. покращилися за індикаторами декарбонізації та політики щодо забруднення. Найповніше представлено викиди Scope 1, енергоспоживання, атмосферні викиди, водні показники та поводження з відходами. Найбільші прогалини пов’язані з відсутністю окремих показників Scope 2 і Scope 3, обмеженим розкриттям діяльності в зонах водного стресу та впливів на природоохоронні території.

Ferrexpo має найбільш збалансований профіль розкриття. У 2023 р. покращилися оцінки Scope 3, заходів декарбонізації, політики й результатів у сфері біорізноманіття; у 2024 р. досягнутий рівень зберігся.

Найбільшу позитивну динаміку продемонстрував Interpipe. У 2024 р. розширено кліматичні розкриття, внаслідок чого низка індикаторів ESRS E1 отримала 5 балів. Сильними сторонами є також використання металобрухту, ресурсоефективність і поводження з відходами. Водночас через виробничу специфіку та недостатню деталізацію нижчими залишаються оцінки за ESRS E4, зокрема щодо площі порушених земель.

У 2024 р. найвище значення інтегрального індексу отримав Interpipe 68,4 %, друге місце посіла Ferrexpo – 65,6 %, тоді як показник Metinvest становив 56,6 %. Звітність Interpipe та Ferrexpo відповідала достатньому рівню екологічної прозорості, а Metinvest середньому. Порівняно з 2022 р. індекс Interpipe збільшився на 9,1 відсоткового пункта, Ferrexpo – на 2,3, Metinvest – на 1,3 відсоткового пункта. Середнє значення інтегрального індексу за дев’ятьма спостереженнями становило 61,0 %. Жоден із проаналізованих звітів не досяг високого

Таблиця 4

Результати оцінювання екологічних розкриттів Ferrexpo

Код	Індикатор	2022 р.	2023 р.	2024 р.
E1.1	Кліматична політика та план переходу	4	4	4
E1.2	Кількісні кліматичні цілі, базовий і цільовий роки	4	4	4
E1.3	Викиди Scope 1	4	4	4
E1.4	Викиди Scope 2	4	4	4
E1.5	Викиди Scope 3	3	4	4
E1.6	Сукупні викиди ПГ та інтенсивність	4	4	4
E1.7	Енергоспоживання та частка відновлюваної енергії	4	4	4
E1.8	Заходи, ресурси й результати декарбонізації	3	4	4
E2.1	Політика та заходи щодо забруднення	3	3	3
E2.2	Викиди забруднювальних речовин в атмосферу	3	3	3
E2.3	Скиди та стічні води	3	3	3
E2.4	Небезпечні речовини	2	2	2
E2.5	Інциденти, перевищення та штрафи	2	2	2
E3.1	Політика, впливи й ризики щодо води	3	3	3
E3.2	Забір води за джерелами	3	3	3
E3.3	Споживання води та інтенсивність	3	3	3
E3.4	Скидання, повторне використання та оборотне водопостачання	3	3	3
E3.5	Об'єкти у зонах водного стресу та заходи	2	2	2
E4.1	Політика щодо біорізноманіття	3	4	4
E4.2	Об'єкти поблизу природоохоронних територій	3	3	3
E4.3	Впливи на види, оселища й екосистеми	3	3	3
E4.4	Площа порушених земель	4	4	4
E4.5	Площа рекультивованих, відновлених або озеленених земель	4	4	4
E4.6	Цілі, заходи й результати щодо біорізноманіття	3	4	4
E5.1	Політика ресурсоефективності та циркулярності	3	3	3
E5.2	Використані матеріали, вторинна сировина та металобрухт	3	3	3
E5.3	Утворення відходів за видами та небезпечністю	4	4	4
E5.4	Повторне використання, перероблення, відновлення та видалення	3	3	3
E5.5	Відвали, хвостосховища та шлаки	4	4	4
E5.6	Кількісні цілі та результати щодо ресурсів і відходів	3	3	3

Джерело: розраховано автором за результатами контент-аналізу корпоративної звітності [18-20].

рівня понад 80 %. У середньому найвищі оцінки отримали ESRS E1 і ESRS E5 по 68,9 %, далі ESRS E3 61,8 %, ESRS E2 56,0 %. Найнижчий результат зафіксовано за ESRS E4 49,6 %, що підтверджує недостатню повноту розкриття впливів на біорізноманіття та екосистеми.

Отже, результати засвідчують поступове підвищення якості екологічної звітності, але водночас виявляють нерівномірність тематичного охоплення, нестабільність меж звітування, недостатність методологічних пояснень і вибірковість незалежного підтвердження. Високе значення індексу означає кращу інформаційну прозорість, але не обов'язково нижчий фактичний вплив підприємства на довкілля.

Головні висновки. У результаті дослідження розроблено й апробовано методичний підхід до комплексного оцінювання повноти та якості розкриття екологічної інформації у корпоративній звітності відповідно до ESRS E1 – E5. Запропонована методика охоплює 30 індикаторів і передбачає застосування шестирівневої шкали від 0 до 5 балів, розрахунок часткових індексів за кожним екологічним стандартом та інтегрального індексу екологічної прозорості. За результатами контент-аналізу дев'яти корпоративних звітів Metinvest, Ferrexpo та Interpipe за 2022 – 2024 рр. здійснено 270 індикаторних оцінювань. Середнє значення інтегрального індексу за всією вибіркою становило 61,0 %, що відповідає достатньому рівню екологічної прозорості. Водночас жоден із проаналізованих звітів не досяг високого рівня, визначеного на рівні понад 80 %, що свідчить про наявність суттєвих резервів для підвищення повноти, порівнюваності та підтвердженості екологічних даних.

Таблиця 5

Результати оцінювання екологічних розкриттів Interpipe

Код	Індикатор	2022 р.	2023 р.	2024 р.
E1.1	Кліматична політика та план переходу	3	3	4
E1.2	Кількісні кліматичні цілі, базовий і цільовий роки	3	3	4
E1.3	Викиди Scope 1	4	4	5
E1.4	Викиди Scope 2	4	4	5
E1.5	Викиди Scope 3	3	3	5
E1.6	Сукупні викиди ПГ та інтенсивність	4	4	5
E1.7	Енергоспоживання та частка відновлюваної енергії	4	4	4
E1.8	Заходи, ресурси й результати декарбонізації	3	4	4
E2.1	Політика та заходи щодо забруднення	3	3	4
E2.2	Викиди забруднювальних речовин в атмосферу	4	4	4
E2.3	Скиди та стічні води	3	3	3
E2.4	Небезпечні речовини	2	2	2
E2.5	Інциденти, перевищення та штрафи	2	2	3
E3.1	Політика, впливи й ризики щодо води	3	3	3
E3.2	Забір води за джерелами	4	4	4
E3.3	Споживання води та інтенсивність	4	4	4
E3.4	Скидання, повторне використання та оборотне водопостачання	4	4	4
E3.5	Об'єкти у зонах водного стресу та заходи	1	1	2
E4.1	Політика щодо біорізноманіття	2	2	3
E4.2	Об'єкти поблизу природоохоронних територій	1	1	2
E4.3	Впливи на види, оселища й екосистеми	2	2	3
E4.4	Площа порушених земель	0	0	0
E4.5	Площа рекультивованих, відновлених або озеленених земель	2	2	2
E4.6	Цілі, заходи й результати щодо біорізноманіття	2	2	3
E5.1	Політика ресурсоефективності та циркулярності	4	4	4
E5.2	Використані матеріали, вторинна сировина та металобрухт	4	4	4
E5.3	Утворення відходів за видами та небезпечністю	4	4	4
E5.4	Повторне використання, перероблення, відновлення та видалення	4	4	4
E5.5	Відвали, хвостосховища та шлаки	3	3	3
E5.6	Кількісні цілі та результати щодо ресурсів і відходів	4	4	4

Джерело: розраховано автором за результатами контент-аналізу корпоративної звітності [21-24].

Таблиця 6

Часткові та інтегральні індекси екологічної прозорості, %

Група	Рік	E1	E2	E3	E4	E5	ІЕП	Рівень
Metinvest	2022	50,0	56,0	64,0	43,3	63,3	55,3	середній
Metinvest	2023	50,0	56,0	64,0	43,3	63,3	55,3	середній
Metinvest	2024	52,5	60,0	64,0	43,3	63,3	56,6	середній
Ferrexpo	2022	75,0	52,0	56,0	66,7	66,7	63,3	достатній
Ferrexpo	2023	80,0	52,0	56,0	73,3	66,7	65,6	достатній
Ferrexpo	2024	80,0	52,0	56,0	73,3	66,7	65,6	достатній
Interpipe	2022	70,0	56,0	64,0	30,0	76,7	59,3	середній
Interpipe	2023	72,5	56,0	64,0	30,0	76,7	59,8	середній
Interpipe	2024	90,0	64,0	68,0	43,3	76,7	68,4	достатній

Джерело: розраховано автором за результатами кодування 270 екологічних розкриттів у дев’яти корпоративних звітах [15-24].

У 2024 р. найвище значення інтегрального індексу отримав Interpipe 68,4 %, показник Ferrexpo становив 65,6 %, а Metinvest – 56,6 %. Порівняно з 2022 р. найбільше зростання продемонстрував Interpipe на 9,1 відсоткового пункта, що переважно зумовлено розширенням кліматичних розкриттів. Індекс Ferrexpo збільшився на 2,3 відсоткового пункта, Metinvest на 1,3 відсоткового пункта. Отримані результати підтверджують позитивну, проте нерівномірну динаміку розвитку екологічної звітності досліджуваних корпоративних груп.

Найповніше у звітах розкривалася інформація за ESRS E1 «Зміна клімату» та ESRS E5 «Використання ресурсів і циркулярна економіка», середні значення індексів становили по 68,9 %. Показник за ESRS E3 «Водні та морські ресурси» дорівнював 61,8 %, за ESRS E2 «Забруднення» – 56,0 %. Найнижчу оцінку отримав блок ESRS E4 «Біорізноманіття та екосистеми» – 49,6 %. Основними проблемами є недостатнє розкриття впливів на види, оселища й природоохоронні території, обмежена деталізація даних про забруднення, відсутність стабільних меж звітування, неповне пояснення методик розрахунку та вибіркове незалежне підтвердження показників.

Отже, застосування ESRS E1 – E5 як єдиної аналітичної основи забезпечує більш обґрунтоване порівняння корпоративної екологічної звітності та дає змогу визначити конкретні напрями її вдосконалення. Підприємствам доцільно забезпечити сталість організаційних меж, розширити кількісне розкриття показників, наводити методики їх розрахунку, базові й цільові значення, пояснювати причини змін та збільшувати обсяг даних, охоплених незалежним підтвердженням. Водночас розрахований індекс характеризує якість публічного розкриття екологічної інформації, а не фактичний рівень впливу підприємства на довкілля, що необхідно враховувати під час інтерпретації результатів.

Перспективи використання результатів дослідження. Запропонований методичний підхід може бути використаний підприємствами для оцінювання готовності до звітування за ESRS, виявлення прогалин в екологічній інформації та вдосконалення систем її обліку, контролю й незалежного підтвердження, а також адаптований для порівняльного аналізу ESG-звітності підприємств інших галузей.

Література

1. Сидоренко К. Р., Нямещук Г. В. Інтеграція ESG-принципів у систему менеджменту підприємства. *Економічний простір*. 2026. № 213. С. 463 – 470. DOI: https://doi.org/10.30838/EP.213.463-470
2. World Steel Association. *Sustainability Indicators 2025 Report*. URL: https://worldsteel.org/steel-topics/sustainability/sustainability-indicators/ (дата звернення: 20.07.2026).
3. International Energy Agency. *Iron and Steel Technology Roadmap: Towards More Sustainable Steelmaking*. Paris: IEA, 2020.
4. International Energy Agency. *Iron and Steel Technology Roadmap: Towards More Sustainable Steelmaking*. Paris: IEA, 2020. URL: https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap (дата звернення: 20.07.2026).
5. Directive (EU) 2022/2464 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2022 as regards corporate sustainability reporting. *Official Journal of the European Union*. 2022. L 322. P. 15 – 80. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2022/2464/oj/eng (дата звернення: 20.07.2026).
6. Commission Delegated Regulation (EU) 2023/2772 of 31 July 2023 supplementing Directive 2013/34/EU as regards sustainability reporting standards. *Official Journal of the European Union*. 2023. L 2023/2772. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2023/2772/oj/eng (дата звернення: 20.07.2026).
7. Regulation (EU) 2023/956 of the European Parliament and of the Council of 10 May 2023 establishing a carbon border adjustment mechanism. *Official Journal of the European Union*. 2023. L 130. P. 5 2– 104. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/956/oj/eng (дата звернення: 20.07.2026).
8. Олійник О. В., Захаров Д. М. Виклики та перспективи ESG-звітності: аналіз теоретичних і практичних аспектів. *Економіка, управління та адміністрування*. 2024. № 3(109). С. 6 7– 73. DOI: https://doi.org/10.26642/ema-2024-3(109)-67-73.
9. Польовик Є., Король С. Нефінансове звітування у промисловому секторі. *Scientia Fructuosa*. 2024. Т. 155, № 3. С. 125 – 142. DOI: https://doi.org/10.31617/1.2024(155)08.
10. Селецька Д. О. Формування ESG-звітності за стандартами GRI: екологічний аспект. *Економіка та суспільство*. 2024. № 69. DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-69-145.
11. Озеран А. В., Коршикова Р. С. Висвітлення екологічних питань згідно з ESRS у нефінансових звітах державних підприємств України. *Фінанси України*. 2024. № 9. С. 113 – 128. DOI: https://doi.org/10.33763/finukr2024.09.113.
12. Mezzanotte F. E. Corporate sustainability reporting: double materiality, impacts, and legal risk. *Journal of Corporate Law Studies*. 2023. Vol. 23, No. 2. P. 633 – 663. DOI: https://doi.org/10.1080/14735970.2024.2319058.
13. Almaqtari F. A., Elsheikh T., Abdelkhair F., Mazrou Y. S. A. The impact of corporate environmental disclosure practices and board attributes on sustainability: empirical evidence from Asia and Europe. *Heliyon*. 2023. Vol. 9, No. 8. Article e18453. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18453.
14. Janik A., Ryszko A. Greenwashing in sustainability reporting: a systematic literature review of strategic typologies and content-analysis-based measurement approaches. *Sustainability*. 2026. Vol. 18, No. 1. Article 17. DOI: https://doi.org/10.3390/su18010017.
15. Metinvest B.V. *Annual Report 2022: United on All Fronts*. 2023. URL: https://metinvestholding.com/en/investor/annualreports (дата звернення: 20.07.2026).
16. Metinvest B.V. *Annual Report 2023: Steadfast*. 2024. URL: https://metinvestholding.com/ar2023/ (дата звернення: 20.07.2026).
17. Metinvest B.V. *Annual Report 2024: Staying the Course*. 2025. URL: https://metinvestholding.com/en/investor/annualreports (дата звернення: 20.07.2026).

18. Ferrexpo plc. *Responsible Business Report 2022*. 2023. URL: https://www.ferrexpo.com/responsibility/responsible-business-reports/ (дата звернення: 20.07.2026).
19. Ferrexpo plc. *Responsible Business Report 2023*. 2024. URL: https://www.ferrexpo.com/responsibility/responsible-business-reports/ (дата звернення: 20.07.2026).
20. Ferrexpo plc. *Responsible Business Report 2024: United in Purpose*. 2025. URL: https://www.ferrexpo.com/media/ozdjzt2e/ferrexpo-14815-rb-report-2024-fa-2-nov-6-1.pdf (дата звернення: 20.07.2026).
21. Interpipe. *Interpipe Annual Report 2022*. 2023. URL: https://interpipe.biz/en/reports/ (дата звернення: 20.07.2026).
22. Interpipe. *Interpipe Annual Report 2023*. 2024. URL: https://interpipe.biz/en/reports/ (дата звернення: 20.07.2026).
23. Interpipe. *Annual Report of Interpipe Group of Companies 2024*. 2025. URL: https://interpipe.biz/en/reports/ (дата звернення: 20.07.2026).
24. Interpipe. *Assurance Report on Interpipe GHG Emissions 2023–2024*. 2025. URL: https://interpipe.biz/en/reports/ (дата звернення: 20.07.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 04.09.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

УДК 629.7.01: 354: 321.01: 574.08
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.49

НАУКОВЕ ОБГРУНТУВАННЯ КОНЦЕПЦІЇ СТВОРЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНОЇ СИСТЕМИ АНАЛІЗУ ЕКОЛОГІЧНОЇ СИТУАЦІЇ ТА РАННЬОГО СПОВІЩЕННЯ ПРО МОЖЛИВІ ЕКОЛОГІЧНІ КАТАСТРОФИ

Машков О.А. (orcid.org/0000-0001-9227-4647),
Андрійчук Ю.М. (orcid.org/0009-000-7487-2256),
Іванов С.Г. (orcid.org/0000-0002-7833-1155),
Леліченко Д.О. (orcid.org/0009-0007-4938-9212)
Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, 03035, м. Київ
dnu_iev@ukr.net, mashkov_oleg_52@ukr.net

Розглянуті концептуальні основи творення інформаційно-аналітичної системи аналізу екологічної ситуації та раннього сповіщення про можливі екологічні катастрофи. Запропоновано методичний підхід щодо оцінки ситуації з питань раннього оповіщення про можливі екологічні катастрофи, якій передбачає формалізацію ризиків надзвичайних ситуацій як провісників екологічних катастрофічних ситуацій (нормативне регулювання моніторингу ризиків, визначення суб'єктів здійснення державного екологічного моніторингу, формування напрямів реформування системи моніторингу відповідно до типу природного ресурсу), а також обгрунтування проблем створення ефективної системи управління ризиками та раннього оповіщення. Розробка проекту концепції створення інформаційно-аналітичної системи аналізу екологічної ситуації та раннього сповіщення про можливі екологічні катастрофи передбачає: формалізацію інформаційно-аналітичної діяльності в сфері екологічного управління, аналіз існуючих інтегрованих інформаційно-аналітичних систем в сфері екологічного управління, оцінку вимог щодо апаратного та програмного забезпечення в системі підтримки прийняття управлінських рішень при аналізу екологічної ситуації та раннього сповіщення про можливі екологічні катастрофи. Створення та застосування інформаційно-аналітичної системи підтримки прийняття управлінських рішень для забезпечення функціональної стійкості екосистем з використанням аерокосмічних технологій в умовах надзвичайних екологічних ситуацій в реальному часі передбачає динамічне прогнозування екологічних процесів. Оскільки методологія побудови автоматизованої системи підтримки прийняття управлінських рішень для забезпечення функціональної стійкості екосистем на сьогоднішній день розроблена недостатньо, а визначене завдання занадто далека від свого вичерпного рішення в зв'язку з випадками надзвичайних ситуацій, що почастішали, вона набуває особливої актуальності. Розроблений проект концепції є підґрунтям створення та застосування інформаційно-аналітичної системи в галузі раціонального природокористування при моделюванні та прогнозуванні стану навколишнього природного середовища, технології подолання негативних впливів на нього. *Ключові слова:* екологічна безпека, екологічна катастрофа, екологічна ситуація, інформаційно-аналітична система, концепція, моделювання та прогнозування, надзвичайні ситуації, раннє оповіщення, раціональне природокористування, стан навколишнього природного середовища, технології подолання негативних впливів на довкілля.

Scientific substitution of the concept of creating an information and analytical system for analysis of the ecological situation and early warning of possible ecological disasters. Mashkov O., Andriychuk Yu., Ivanov S., Lelichenko D.

The article considers the issue of developing a concept for creating an information and analytical system for analyzing the environmental situation and early warning of possible environmental disasters. A methodological approach is proposed for assessing the situation on early warning of possible environmental disasters, which involves formalizing the risks of emergency situations as predictors of environmental catastrophic situations (regulatory regulation of risk monitoring, identification of subjects of state environmental monitoring, formation of directions for reforming the monitoring system according to the type of natural resource), as well as substantiating the problems of creating an effective risk management and early warning system. The development of a draft concept for creating an information and analytical system for analyzing the environmental situation and early warning of possible environmental disasters involves: formalizing information and analytical activities in the field of environmental management, analyzing existing integrated information and analytical systems in the field of environmental management, assessing the requirements for hardware and software in the system for supporting management decision-making in analyzing the environmental situation and early warning of possible environmental disasters. Creation and application of an information and analytical system for supporting management decisions to ensure the functional stability of ecosystems using aerospace technologies in conditions of emergency environmental situations in real time involves dynamic forecasting of ecological processes. Since the methodology for building an automated system for supporting management decisions to ensure the functional stability of ecosystems is currently insufficiently developed, and the defined task is too far from its exhaustive solution in connection with the increasing frequency of emergency situations, it acquires particular relevance. The developed draft concept is the basis for the creation and application of an information and analytical system in the field of rational environmental

© Машков О.А., Андрійчук Ю.М., Іванов С.Г., Леліченко Д.О., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

management in modeling and forecasting the state of the environment, technologies for overcoming negative impacts on it.
Key words: ecological safety, ecological disaster, ecological situation, information and analytical system, concept, modeling and forecasting, emergencies, early warning, rational use of natural resources, state of the environment, technologies for overcoming negative impacts on the environment.

Постановка проблеми. Російська воєнна агресія проти України, окрім масштабних руйнувань об'єктів житлової та критичної інфраструктури, порушення нормальної роботи значної кількості підприємств, призвела до безпрецедентного погіршення якості життєво важливих ресурсів та екологічного дисбалансу в навколишньому природному середовищі країни. Екологічна безпека – одна зі складових національної безпеки, процес управління системою національної безпеки, за якого державними і недержавними інституціями забезпечується екологічна рівновага та гарантується захист середовища проживання населення країни і біосфери в цілому, атмосфери, гідросфери, літосфери і космосфери, видового складу тваринного і рослинного світу, природних ресурсів, збереження здоров'я і життєдіяльності людей і виключаються віддалені наслідки цього впливу для теперішнього і майбутніх поколінь. Екологічна безпека може бути розглянута в глобальних, регіональних, локальних і умовно точкових межах, у тому числі в межах держав і будь-яких їхніх підрозділів. Фактично вона характеризує геосистеми (екосистеми) різного ієрархічного рангу – від біогеоценозів (агро-, урбоценозів) до біосфери загалом [1-3].

Носіями загроз для екологічної безпеки України можуть стати: атмосферне повітря; зміна клімату; водні ресурси; загрози збереженню біологічного та ландшафтного розмаїття, природно-заповідного фонду та формування еконаціональної екологічної мережі; земельні ресурси та ґрунти; надра; відходи; вплив на довкілля енергетики, промисловості, сільського господарства, транспорту тощо [4, 5].

Такі чинники зумовлюють необхідність теоретичного дослідження механізмів створення та застосування автоматизованої системи підтримки прийняття управлінських рішень під час екологічного прогнозування та шляхів їх вдосконалення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Серед західних дослідників розробкою тематики автоматизованої системи підтримки прийняття управлінських рішень під час екологічного прогнозування як визначального напрямку сучасної державної політики у сфері екологічної безпеки займалися Argent R.M., Jagers B., Marakas G.M, Moore A.V., Rizolli A.E. [9, 10].

Також ця проблематика вивчалася цілою низкою вітчизняних дослідників.

Варто визнати, що проблемними питаннями екологічної безпеки займалися вітчизняні та зарубіжні науковці в рамках різних наук: технічних, біологічних, геологічних, хімічних, але системних досліджень даної проблематики саме в автоматизації підтримки прийняття управлінських рішень під час екологічного прогнозування можна визнати недостатнім [3-7].

Завданням побудови систем підтримки прийняття рішень, що базуються на математичних моделях, приділялася значна увага в роботах Дейнеки В.С., Додонова О.Г., Згуровського М.З., Казимира В.В., Куссуль Н.М., Литвинова В.В., Мокіна В.Б., Петренко А.І., Петрухіна В.О., Сергієнка І.В., Трофімчука О.М., Тульчинского В.Г., Вереса О.М. та ін.). Вирішенню питань формалізації завдань у сфері екологічного моніторингу за допомогою космічних систем дистанційного зондування Землі присвячені роботи Бондаря О.І., Машкова О.А., Патлашенко Ж.І., Пашкова Д.П., Тимошенка М.М., Треснюка В.М., Фролова В.Ф., Шевченка Р.Ю. Аерокосмічні дослідження геологічного середовища розглядалися у працях таких вчених, як Волошин В.І., Востоков А.Б., Кохан С.С., Лялько В.І., Мичак А.Г., Попов М.О., Федоровський О.Д., Філіпович В.Є., В.Л. Приходько В.Л. Питання ризиків життєдіяльності у природно-техногенному середовищі розглядали Биченок М.М., Іванюта С.П., Качинський А.В., Кліменко В.І., Яковлев Є.О. та ін. [3-8].

Невирішена раніше частина загальної проблеми. Проведений аналіз основних наукових підходів в дослідженні державно-управлінських механізмів управління екологічними ризиками, аналіз існуючих систем для розуміння, оцінки та передачі інформації про ризики екологічних катастроф та оцінка вимог щодо алгоритмічного та програмного забезпечення в системі підтримки прийняття управлінських рішень у регіональній системі екологічного моніторингу визначив необхідність в створенні принципово нових підходів до побудови автоматизованих систем підтримки прийняття управлінських рішень при екологічному прогнозуванні з використанням інформаційних технологій та математичних моделей, які дозволили би істотно не тільки підвищити швидкодію прийняття рішень, а й приймати найбільш ефективні управлінські рішення з метою забезпечення екологічної безпеки екосистем. Для прийняття рішень за допомогою автоматизованих системах підтримки прийняття управлінських рішень в умовах надзвичайних екологічних ситуацій особі, яка приймає рішення (ОПР) необхідно аналізувати значні обсяги іноді неповної, неточної інформації, що швидко змінюється в часі, при обмеженнях часу на оцінку обстановки і прийняття управлінських екологічних рішень.

Необхідність прийняття ефективних (найкращих, оптимальних) управлінських екологічних рішень за мінімальний час внаслідок непрогнозованої та

високої динаміки надзвичайних екологічних ситуацій, а також великого обсягу різнорідної вхідної інформації стосовно навколишнього середовища та стану техногенно небезпечних об'єктів, частина якої є невизначеною, висуває завдання, вирішення яких перевищує фізіологічні можливості ОПР. Застосування існуючих методик оцінки екологічного ризику та загроз, заснованих на статистичних методах, пов'язане з обробкою інформації отриманої на час виникнення надзвичайної екологічної ситуації та не враховую подальшу динаміку її розвитку у часі та просторі.

Мета дослідження: наукове обґрунтовування концепції створення інформаційно-аналітичної системи аналізу екологічної ситуації та раннього сповіщення про можливі екологічні катастрофи на основі аналізу ситуації з питань раннього оповіщення про можливі екологічні катастрофи

Результати дослідження.

1. Науково-практичні проблеми оцінки ситуації з питань раннього оповіщення про можливі екологічні катастрофи.

Створення інформаційно-аналітичної системи аналізу екологічної ситуації та раннього сповіщення про можливі екологічні катастрофи передусім обумовлено:

– відсутністю загальнодержавної природоохоронної інформаційно-телекомунікаційної інфраструктури органів державної влади та органів місцевого самоврядування для виконання їх повноважень та акумуляції інформації у сфері охорони навколишнього природного середовища, в тому числі раціонального використання, відтворення і охорони природних ресурсів;

– недостатньо чітким розподілом повноважень, низьким рівнем координації дій та інституційної спроможності органів державної влади та органів місцевого самоврядування у збиранні, накопичені та обміні екологічною інформацією, внаслідок чого існують автономні та неуніфіковані за структурою реєстри/бази даних, наявне дублювання функцій, нераціональне використання коштів державного бюджету на збирання та накопичення однотипної інформації про стан навколишнього природного середовища;

– наявністю значної кількості несистематизованої та непереведеної у цифровий формат екологічної інформації про стан навколишнього природного середовища на паперових носіях;

– необхідністю приведення нормативно-правових актів з питань надання, збирання, звітності, експертного аналізу, накопичення, обміну та розпоряджання інформацією про стан навколишнього природного середовища у відповідність з європейськими вимогами;

– відсутністю комплексного підходу та механізму автоматизованої інтегральної оцінки даних про суб'єкт господарювання, який використовує природні ресурси та спричиняє вплив на навколишнє природне середовище;

– необхідністю впровадження ефективного превентивного механізму запобігання та протидії корупції, посилення громадського контролю за діяльністю органів державної влади та органів місцевого самоврядування у сфері охорони навколишнього природного середовища, в тому числі раціонального використання, відтворення і охорони природних ресурсів.

Напрями реформування системи моніторингу відповідно до типу природного ресурсу передбачають здійснення екологічного моніторингу: атмосферного повітря, водних ресурсів, підземних вод, надр, техногенне небезпечних об'єктів (об'єктів критичної інфраструктури).

Одне з важливих завдань створення загальнодержавної інтегрованої інформаційно-аналітичної системи – це збір, накопичення та систематизація інформації щодо заходів державного екологічного контролю. Наявність такої системи дозволить забезпечити прозорості діяльності органів державного екологічного контролю, поліпшити координацію роботи органів державного екологічного контролю, забезпечити інформування громадськості про заходи державного екологічного контролю, що, в свою чергу, підвищить можливості участі громадськості у контролі за станом навколишнього природного середовища. Під час роботи єдиної загальнодержавної системи моніторингу навколишнього природного середовища Україна зможе не лише здійснювати ефективний контроль за станом навколишнього природного середовища, але й обмінюватися даними з іншими країнами з метою зменшення ризиків виникнення транскордонних надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру.

З метою досягнення ефективного результату, окрім вдосконалення державної системи моніторингу для підвищення рівня розуміння ризиків надзвичайних ситуацій та прогнозування реагування на них, рекомендується:

1. Забезпечити функціонування єдиної державної системи моніторингу навколишнього природного середовища на базі Міністерства економіки, довкілля та сільського господарства України.

Для цього потрібно:

–затвердити на законодавчому рівні єдину методологію збору, обробки та експорту даних постів спостереження до національної системи моніторингу навколишнього природного середовища;

– автоматизувати збір, обробку, аналіз та зберігання екологічної інформації про стан навколишнього природного середовища;

– включити до загальнодержавної системи моніторингу навколишнього природного середовища дані результатів виробничого контролю складу та властивостей стічних вод для моніторингу їх впливу на стан поверхневих вод;

–додати до переліку даних, що збираються до державної системи моніторингу, дані щодо рівня підняття ґрунтових та шахтних вод і наявності у цих водах небезпечних речовин (сполук).

Бажано також реалізувати в повному обсязі регіональні цільові програми моніторингу довкілля з та створення умов для об'єднання регіональних систем моніторингу з загальнодержавною системою.

У разі впровадження інтегрованої автоматизованої системи «Екологічний контроль»-забезпечення обміну даними між єдиною державною системою моніторингу довкілля та системою «Екологічний контроль».

Також необхідно значно підвищити роль громадськості у контролі за станом довкілля за рахунок забезпечення доступу до даних регіональних та загальнодержавної системи моніторингу довкілля, що викладені на загальнодержавному ресурсі в мережі інтернет у доступному вигляді.

Отже, доцільним є вжиття таких заходів:

– створення ефективної системи збору, обробки та оприлюднення інформації;

– впровадження єдиної методологічної та організаційної основи управління ризиками;

– створення ефективних механізмів координації між приватним та публічним секторами.

Будь-яка програма, стратегія та концепція, що розробляються на державному чи регіональному рівні перш за все мають враховувати не лише факт наявності екологічне небезпечних об'єктів в регіонах, а й їх існуючий та прогнозований стан. Розуміння реального стану цих об'єктів є необхідністю. При цьому слід враховувати їх місцезнаходження, та ризики транскордонних надзвичайних ситуацій.

На сьогодні, в контексті питання щодо підсилення готовності до надзвичайних ситуацій на національному рівні, доцільно передбачити й такі заходи:

1. Вдосконалення системи моніторингу екологічних та техногенних ризиків. Для створення системи, яка б відповідала міжнародним та європейським стандартам у сфері моніторингу НПС, потрібно збільшення кількості та покращення якості технічного обладнання, за допомогою якого відбувається збір даних щодо стану об'єктів моніторингу.

2. Підвищення рівня відповідальності бізнесу, розуміння необхідності запровадження на підприємствах використання найкращих доступних технологій, запровадження управління екологічними ризиками на основі їх моделювання, із залученням новітніх інформаційних технологій, дотримання вимог результатів оцінки впливу на НПС.

3. Реформування (або ж створення нових) систем масового оповіщення населення про ризики.

Для регіонів, постраждалих внаслідок воєнних дій і на території яких розташована значна кількість об'єктів, що негативно вливають на навколишнє природне середовище, рекомендовано розробити окремий комплекс заходів, спрямованих на мінімізацію негативних наслідків воєнних дій, неконтрольованого затоплення шахт та просідання ґрунтів

2. Наукові проблеми розробки проекту концепції створення інформаційно-аналітичної системи аналізу екологічної ситуації та раннього сповіщення про можливі екологічні катастрофи.

Концепція створення інформаційно-аналітичної системи для аналізу екологічної ситуації передбачає розробку системи, яка збиратиме, оброблятиме та аналізуватиме дані про довкілля для підтримки прийняття рішень у сфері екологічної безпеки. Вона повинна включати: модулі для збору даних, база даних, аналітичний модуль, модуль візуалізації та інтерфейс користувача. Концепція передбачає геопросторовий підхід, використання геоінформаційних систем (ГІС), інтеграцію даних з різних джерел та впровадження методів штучного інтелекту для прогнозування та виявлення тенденцій.

Важливим є створення інформаційно-аналітичної системи аналізу екологічної ситуації та раннього сповіщення про можливі екологічні катастрофи, яка забезпечить централізовану координацію між державними установами, місцевими органами виконавчої влади та громадськістю. Особливий акцент має бути зроблений на попередженні катастроф, а не лише на реагуванні на їх наслідки. Це вимагає інтеграції сучасних технологій, а саме прогностичних моделей, та посилення міжнародного співробітництва, включаючи впровадження найкращих світових практик.

Функціональна стійкість до екологічних ризиків та забезпечення екологічної безпеки має стати невід'ємною частиною національної і регіональних політик. Для цього необхідно розвивати системи раннього попередження, що базуються на даних екологічного моніторингу, і забезпечити регулярне оновлення інформації про екологічні ризики. Підвищення обізнаності суспільства та участь громадян у питаннях зниження ризиків катастроф також мають стати пріоритетом, оскільки рівень підготовки населення безпосередньо впливає на стійкість громад до екологічних викликів, що зростають у сучасних умовах.

Автори вважають доцільним запровадити централізовану міжвідомчу платформу для координації дій, збору, аналізу та обміну даними про надзвичайні ситуації (нештатні, аварійні, катастрофічну) екологічні ризики. Така система має відповідати міжнародним практикам та вимогам, зокрема вимогам Сендайської програми, та використовувати сучасні інформаційні технології. Модернізувати наявні системи раннього попередження з урахуванням інформації від систем екологічного спостереження та прогнозів. Забезпечити їхню доступність для всіх регіонів України, особливо для територій із високим рівнем ризику природних та техногенних катастроф, а саме посухи, паводки та лісові пожежі. Бажано розробити та впровадити єдину методологію для оцінки ризиків катастроф, спричинених змі-

ною клімату. Це дозволить забезпечити проведення таких оцінок у всіх регіонах України, а також у ключових секторах: економіки, сільського господарства, водних ресурсів та лісового господарства тощо. При цьому необхідне організувати національні освітні кампанії, спрямовані на інформування населення про ризики катастроф та необхідність адаптаційних заходів, що забезпечить доступність інформації про ризики катастроф завдяки сучасним медіа та інтерактивним платформам. Також потрібно активніше залучати міжнародну допомогу, досвід та ресурси для впровадження адаптаційних заходів до зміни клімату. Потрібно використовувати найкращі практики інших країн для вдосконалення системи управління ризиками екологічних катастроф в Україні. Також потрібно передбачити у державному бюджеті статті видатків на заходи із запобігання виникненню надзвичайних ситуацій природного характеру та забезпечити належне матеріально- технічне оснащення установ, що відповідають за управління ризиками, особливо у регіонах із підвищеним рівнем небезпеки.

На території України функціонує значна кількість споруд, класифікованих як потенційно небезпечні об'єкти, аварії на яких можуть призвести до виникнення техногенних надзвичайних ситуацій. В умовах збройної агресії РФ забезпечення безпеки життя та здоров'я населення, а також екологічної безпеки територій, де розташовані потенційно небезпечні об'єкти, набуває особливої актуальності. При оцінюванні ризиків необхідно враховувати не лише безпосередні наслідки аварій на об'єктах, але й потенційний вплив на населення, інфраструктуру прилеглих територій та інші промислові об'єкти.

За таких обставин існує нагальна потреба у створенні комплексних систем моніторингу стану потенційно небезпечних об'єктів на всіх рівнях: об'єктовому, місцевому, регіональному та державному. Хоча наразі функціонує значна кількість систем моніторингу стану потенційно небезпечних об'єктів об'єктового та місцевого рівнів, підвищення надійності експлуатації та рівня безпеки потенційно небезпечних об'єктів можливо забезпечити шляхом удосконалення процесів збору, обробки та передачі даних в інформаційній системі моніторингу стану потенційно небезпечних об'єктів на основі розроблення спеціалізованого прикладного програмного забезпечення з використанням технології інтернету речей та розроблення програмного забезпечення та методів обробки інформації.

Сучасна система моніторингу стану потенційно небезпечних об'єктів – це новітній програмно-технічний комплекс, що базується на принципах інженерії програмного забезпечення та використовує сучасні методи розробки програмного забезпечення. Впровадження такої системи дозволяє підвищити ефективність експлуатації промислових об'єктів та поліпшити організацію захисту населення та робочого персоналу у спосіб раннього виявлення можливості виникнення надзвичайної ситуації. На сьогодні на регіональному та державному рівнях такі системи не створені. Аналіз наявних систем моніторингу стану потенційно небезпечних об'єктів демонструє, що такі програмні комплекси здійснюють збір та обробку даних щодо ключових параметрів об'єкта та виконують їх параметричний контроль.

Програмне забезпечення визначає, чи перевищують значення одного або декількох контрольованих параметрів об'єкта попередньо встановлені критичні рівні, або наближаються до них. При виявленні перевищення критичних значень параметрів, система автоматично генерує сповіщення для чергового персоналу про можливість виникнення надзвичайної ситуації та надає покрокові інструкції щодо необхідних дій для запобігання розвитку аварії та недопущення переходу об'єкта у стан надзвичайної ситуації. Такий підхід суттєво обмежує часові рамки для впровадження протиаварійних заходів. До того ж сучасні промислові об'єкти характеризуються складною просторово розподіленою структурою, що охоплює значні території. Це створює підвищену вразливість компонентів програмно-апаратного комплексу моніторингу стану потенційно небезпечних об'єктів до електромагнітних завад.

Створення інформаційно-аналітичних систем, що реально відповідають цілям і завданням організації, визначається як достатньо складний процес, що включає етапи формування концепції, проектування, розробки, впровадження і супроводу.

Технологія і методика створення інформаційно-аналітичної системи охоплює наступні види діяльності:

– збір, аналіз та деталізація вимог до інформаційно-аналітичної системи, визначення пріоритетів реалізації цих вимог і постановка завдань по їх реалізації, визначення вимого по архітектурі, функціональної стійкості і захисту від несанкціонованого доступу і визначення складу даних;

– розроблення проектних рішень по всіх аспектах побудови інформаційно-аналітичної системи, визначення складу джерел інформації, способів передачі даних, складу додатків організації доступу до даних, проектування архітектури, проектування баз даних;

– розроблення аналітичних додатків, вибір і настройка інструментальних засобів збору, перетворення і очищення даних і організації доступу користувачів до даних, розробка метаданих, тестування, розробка документації для користувачів.

Проблеми, що виникають під час створення інтегрованої інформаційно-аналітичної системи, підлягають вирішенню на найвищому державному рівні.

Підготовка концепції Інформаційно-аналітичної системи аналізу екологічної ситуації та раннього сповіщення про можливі екологічні ризики та катастрофи передбачає визначення інфраструктури,

стандартів, нормативно-методичного забезпечення цієї системи.

Загальною задачею є забезпечення умов як для прийняття зважених, узгоджених та ефективних рішень на всіх рівнях органів державної влади, так і для реалізації широких зв'язків владних структур з громадськістю.

До напрямків функціональної інтеграції в інтегровано-аналітичній системі належать, насамперед, електронізація документообігу, а також процеси збору. Первинної обробки інформації, введення та поповнення її джерел.

Основним джерелом інформації для органів державної влади є звітність суб'єктів захисту довкілля та природних ресурсів та інша інформація, яку подають підприємства, тому вона повинна переводитися в електронну форму.

Основними територіальними й галузевими структурними одиницями інтегрованої інформаційно-аналітичної системи виступають інформаційно-аналітичні системи відповідних органів влади, які організаційно створюються ними, а також Центр управління Інтегрованою інформаційно-аналітичною системою аналізу екологічної ситуації та раннього сповіщення.

Основними інтеграційними складовими інтегрованої інформаційно-аналітичної системи є телекомунікаційне середовище, інтегрована система управління інформаційними ресурсами, інтегрована система електронного документообігу, система управління аналітичною обробкою інформації, система зовнішніх зв'язків, система захисту інформації, нормативно-правове забезпечення.

Зокрема, функціональними складовими інтегрованої інформаційно-аналітичної системи є інформаційно-аналітичні центри (ІАЦ) інформаційно-аналітичної системи (ІАС), які репрезентують в інтегрованій інформаційно-аналітичній системі відповідний орган влади. ІАЦ повинні збирати оперативну інформацію, вести нормативну документацію й класифікатори, проводити оперативний та ретроспективний аналіз інформації, прогнозування розвитку екологічних ситуацій та процесів, захист даних та технологічну підтримку діяльності центру.

Основними вимогами до єдиного телекомунікаційного середовища інтегрованої інформаційно-аналітичної системи, є забезпечення достатніх пропускних можливостей мережі та її дієздатності в умовах впливу різноманітних дестабілізуючих факторів. У зв'язку з високим державним статусом операцій по обміну інформацією в інтегрованій інформаційно-аналітичній системі набирає особливу вагу інформаційна безпека та захист інформації.

Стратегічною метою управління інформацією в інформаційно-аналітичній системі аналізу екологічної ситуації та раннього сповіщення про можливі екологічні катастрофи є вихід через прогноз-аналітичну функцію на управління іншими ресурсами, зокрема трудовими, фінансовими і матеріальними. Саме тому роль держави в управлінні інформаційними ресурсами, як замовника і координатора, є вирішальною.

В цілому процес накопичення та використання інформаційного ресурсу відноситься у більшій мірі до процедури управління знаннями. При цьому управління знаннями розглядається як процес, який базується на інформаційно-аналітичному забезпеченні інтелектуального управління екологічною безпекою держави та регіонів. Управління знаннями – це й освіта, як окремих осіб, так і організація навчання колективу, що забезпечує перехід до інтелектуального управління.

Плідна інформаційно-аналітична діяльність неможлива без нормативних документів, що регламентують технологію створення державними органами інформаційних ресурсів.

У результаті здійснення робіт по створенню інформаційно-аналітичної системи аналізу екологічної ситуації та раннього сповіщення про можливі екологічні катастрофи, яка є складовою частиною Національної програми інформатизації України, передбачається досягти вирішення проблем:

– створення уніфікованої технології отримання інформаційно-аналітичної обробки і накопичення даних та розробки єдиної системи нормативних документів, що регламентує її функціонування;

– створення оперативного і повноцінного доступу користувачів до інформації національного та галузевого фондів стандартів та нормативних документів;

– актуалізація, оптимізація, формування, зберігання, захист та використання інформаційних ресурсів;

– входження до міжнародного інформаційного простору на основі єдиних наукових, організаційних, методологічних, технічних та технологічних засад.

Концептуальна модель інформаційно-аналітичної системи аналізу екологічної ситуації та раннього сповіщення про можливі екологічні катастрофи включає такі етапи: проектування дослідження, інформаційно-аналітичне моделювання та створення прогнозних оцінок і сценаріїв, генерування підсумкових документів і пропозицій.

Інформаційна складова включає збір і опрацювання отриманої інформації за допомогою сучасних інформаційних технологій (аерокосмічні технології, моніторингові комплекси), перевірку достовірності отриманих даних, узагальнення експертних оцінок, ведення баз даних, формування багатофункціональних інформаційних середовищ, створення авторських програм і систем, формування розгалуженого середовища інформаційних ресурсних центрів.

Аналітична складова передбачає генерування масиву актуальної інформації для подальшого аналізу, вимір подій, рівня потужностей та впливів

надзвичайних екологічних ситуацій, виявлення найбільш гострих, актуальних екологічних проблем, конфліктів, ризиків у заданому регіоні; генерацію матеріалів для екологічного прогнозування (визначення найбільш імовірних шляхів розвитку ситуації в регіоні), а також оцінку рівнів прояву небажаних подій в екологічній сфері, в галузи екологічної безпеки.

Аналітична стадія роботи закінчується обчисленнями, що дозволяють одержати ймовірні оцінки, ступені ризику розвитку ситуації та прийняття відповідних рішень за напрямами діяльності відповідних державних установ.

Кожний з інформаційних процесів в інформаційно-аналітичній системі аналізу екологічних ситуацій (рис. 1), використовує певні дані, а також низку моделей, методів. Структурна схема системи підтримки прийняття управлінських екологічних рішень наведена на рис. 2.

Ключові концептуальні аспекти створення та застосування інформаційно-аналітичної системи аналізу екологічної ситуації та раннього сповіщення про можливі екологічні катастрофи передбачає:

1. Геоінформаційний підхід (ГІС): Використання ГІС дозволяє пов'язувати екологічні дані з географічними координатами, створювати тематичні карти та проводити просторовий аналіз.

2. Інтеграція даних: Розробка механізмів для інтеграції даних з різнорідних джерел (наприклад, супутникові дані, дані наземного моніторингу, показники якості повітря, води тощо)

3. Прогнозний аналіз: застосування методів прогнозування, таких як моделювання та машинне навчання, для прогнозування майбутніх екологічних умов, ризиків та наслідків певних подій.

4. Система підтримки прийняття рішень: розроблення функціоналу, який допомагає фахівцям та урядовцям приймати обґрунтовані екологічні рішення, керуючись аналізом даних та прогнозів.

5. Відкритість та доступність: концепція може передбачати створення відкритих платформ для доступу до екологічної інформації для громадськості, науковців та бізнесу, якщо це не суперечить законодавству.

Висновки. Проведений аналіз основних наукових підходів у дослідженні державно-управлінських механізмів управління екологічними ризиками, окреслення існуючих систем для розуміння, оцінки й передачі інформації щодо ризиків екологічних катастроф та оцінка вимог до алгоритмічного та програмного забезпечення в системі підтримки прийняття управлінських рішень у регіональній системі екологічного моніторингу означив необхідність у створенні принципово нових підходів до побудови автоматизованих систем підтримки прийняття управлінських рішень під час екологічного прогнозування з використанням інформаційних технологій та математичних моделей, що дозволить істотно



Рис. 1. Взаємозв'язок інформаційних процесів в інформаційно-аналітичній системі аналізу екологічних ситуацій

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

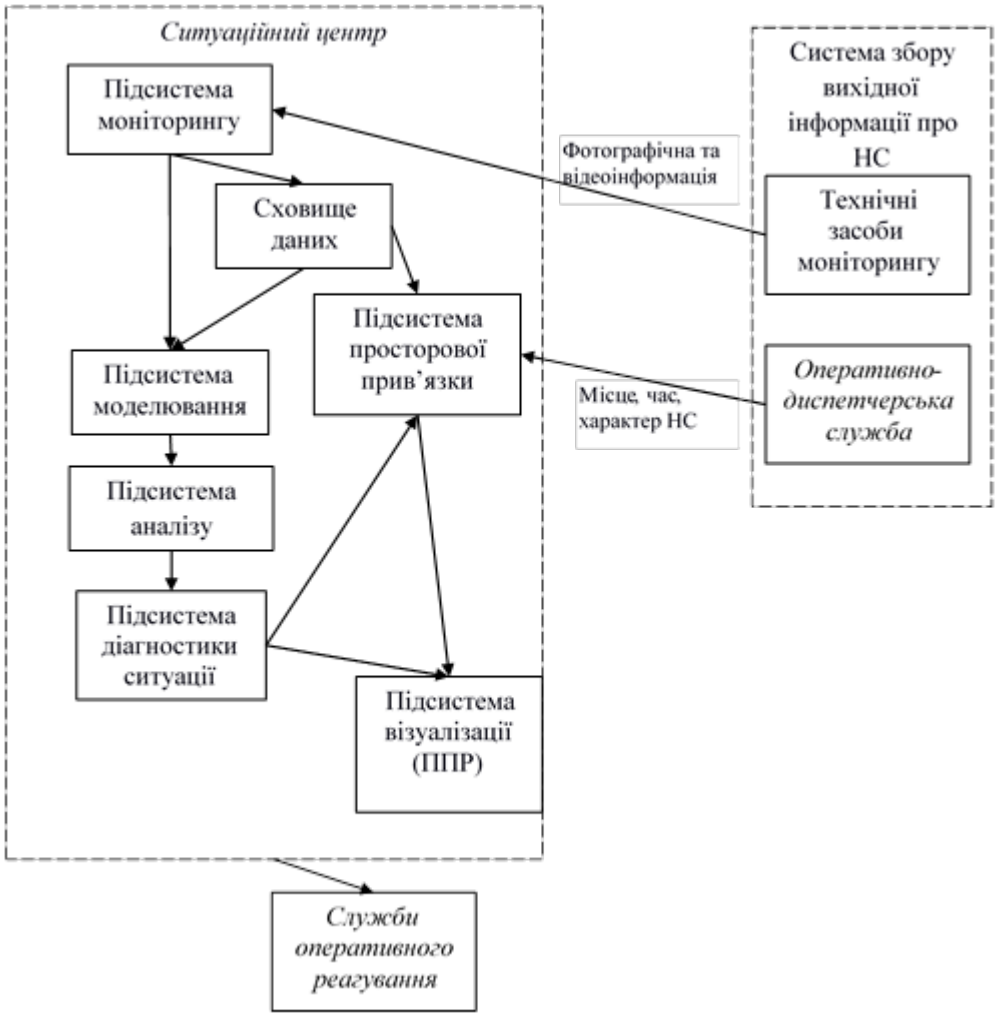


Рис. 2. Структурна схема системи підтримки прийняття управлінських екологічних рішень

прискорити прийняття ефективних управлінських рішень з метою забезпечення екологічної безпеки екосистем.

Наукове завдання праці – визначення ефективності існуючих систем підтримки прийняття управлінських екологічних рішень для забезпечення екологічної безпеки навколишнього середовища та техногенних об'єктів, ааналізу екологічної ситуації та раннього сповіщення про можливі екологічні ризики та катастрофи.

Екосистеми (природні та техногенні системи) в автоматизованих системах підтримки прийняття управлінських рішень під час екологічного прогнозування розглядаються як відкриті складні динамічні системи, що містять сукупність природних та штучних об'єктів, серед яких виділяються екологічні об'єкти, що представляють екологічну небезпеку. Екологічні системи схильні до стабільних або подразнюючих впливів зовнішнього середовища. Проявом останніх є надзвичайні екологічні ситуації, що спонукають прийняття рішень, у основі яких- прогнозування екологічних ситуацій з подальшою оцінкою ризиків та формування відповідних управлінських рішень, спрямованих на збереження функціональної стійкості та забезпечення екологічної безпеки об'єктів спостереження. В умовах надзвичайних екологічних ситуацій ОПР необхідно аналізувати значні обсяги інформації (іноді неповної), що швидко змінюється в часі. Це істотно впливає на здійснення оцінки обстановки та своєчасного прийняття управлінських екологічних рішень, спонукає розглядати екологічну систему в умовах надзвичайної екологічної ситуації яв слабкоструктуровану складну динамічну систему, а необхідність підтримки прийняття управлінських рішень – як непросту формалізовану проблему.

Необхідність прийняття ефективних (дієвих, оптимальних) управлінських екологічних рішень за мінімальний проміжок часу внаслідок непрогнозованої та високої динаміки надзвичайних екологічних ситуацій, а також значного обсягу різнорідної вхідної інформації стосовно навколишнього середовища та стану техногенно небезпечних об'єктів, частина якої є невизначеною, висуває завдання, вирішення

яких перевищує фізіологічні можливості особи, яка приймає рішення. Застосування існуючих методик оцінки екологічного ризику та загроз, заснованих на статистичних методах, пов'язане з обробкою інформації отриманої на час виникнення надзвичайної екологічної ситуації та не враховую подальшу динаміку її розвитку у часі та просторі.

Сучасні статистичні методи оцінки ризику пов'язані з обробкою даних, що описують значні площі, не забезпечують прийняття ефективних управлінських екологічних рішень у умовах розвитку надзвичайних екологічних ситуацій в просторі та часі. Підвищити оперативність, обґрунтованість та ефективність управлінських рішень в умовах надзвичайних екологічних ситуацій в реальному часі можна завдяки застосування автоматизованої системи підтримки прийняття управлінських рішень, що передбачає використання динамічної моделі екологічного ризику, просторово-розподіленої динамічної моделі територіальної системи та моделі надзвичайної екологічної ситуації, що розвивається в її межах, а також забезпечує прогнозування розвитку надзвичайної екологічної ситуації в просторі та часі.

Створення та застосування автоматизованої системи підтримки прийняття управлінських рішень для забезпечення функціональної стійкості екосистем з використанням аерокосмічних технологій в умовах надзвичайних екологічних ситуацій в реальному часі передбачає динамічне прогнозування екологічних процесів. Оскільки методологія побудови автоматизованої системи підтримки прийняття управлінських рішень для забезпечення функціональної стійкості екосистем на сьогоднішній день розроблена недостатньо, а визначене завдання занадто далека від свого вичерпного рішення в зв'язку з випадками надзвичайних ситуацій, що почастішали, вона набуває особливої актуальності.

Розроблений проект концепції-це підґрунтя для створення та застосування інформаційно-аналітичної системи в галузі раціонального природокористування під час моделювання та прогнозування стану навколишнього природного середовища, технології подолання негативних впливів на нього.

Література

1. Постанова Кабінету Міністрів України «Про затвердження Положення про організацію оповіщення про загрозу виникнення або виникнення надзвичайних ситуацій та зв'язку у сфері цивільного захисту» від 27 вересня 2017 року № 733
2. Постанова Кабінету Міністрів України від 13 червня 2024 року № 684 «Порядок функціонування державної системи моніторингу довкілля та її підсистем».
3. Бондар О.І., Машков О.А., Міхеєв В.С. Системний підхід щодо створення системи підтримки екологічних рішень для забезпечення екологічної безпеки держави. Екологічні науки: науково-практичний журнал, 2020. -№ 3(30), 2020, с. 30-38.
4. Гудима О. П. Методологічні основи побудови підсистеми антикризового реагування в системі державного управління. Наукові перспективи. 2022. № 2(20). С. 54–67.
5. Машков О.А., Жукаускас С.В., Нігородова С.А. Прогнозування надзвичайних ситуацій щодо зменшення екологічних загроз та оцінювання ризиків з використанням аерокосмічних технологій. Екологічні науки: науково-практичний журнал, 2019.№ 4(27), 2019, С. 201-206.
6. Машков О.А., Іващенко Т.Г. Проблеми управління екологічною безпекою планованої діяльності за допомогою систем підтримки прийняття управлінських інформаційних екологічних рішень. Науковий часопис Академії національної безпеки, № 3-4 (27-28) 2020, С. 7-34.
7. Петрук В.Г., Машков О.А., Абідов С.Т., Гура К.Ю. Методологія інтегрованого управління екологічною безпекою природоохоронних систем. Екологічні науки: науково-практичний журнал, 2021. № 2(35), С. 153-161.
8. Пріоритети забезпечення екологічної безпеки України в умовах російської воєнної агресії : аналіт. доп. / [С. Іванюта, Л. Якушенко]. – Київ : НІСД, 2024. 61 с. URL:https://doi.org/10.53679/NISS-analytrep.2024.11
9. ISO 14090:2019 Adaptation to climate change – Principles, requirements and guidelines URL: https://www.iso.org/standard/68507.html
10. The Global Environment Facility (GEF). Офіційний веб-сайт. Доступний з URL:https://www.thegef.org/who-we-are.

Дата першого надходження статті до видання: 26.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

УДК 581.5:[582.475+582.664.4]:504.5
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.50

АДАПТИВНА МІНЛИВІСТЬ ТА ФІТОРЕМЕДІАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ПРЕДСТАВНИКІВ РОДІВ *LARIX* MILL. ТА *RIBES* L. В УМОВАХ ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Мордатенко І.Л. (orcid.org/0000-0002-6710-2357),
Солошенко В.С. (orcid.org/0000-0002-7360-8493)
Державний дендрологічний парк «Олександрія» Національної академії наук України
м. Біла Церква, 09113
mangust012@ukr.net, miss456@ukr.net

Сучасний етап розвитку суспільства характеризується стрімким посиленням антропогенного навантаження, хронічним екологічним стресом та погіршенням стану довкілля, особливо на урбанізованих територіях. Військова агресія, мілітарне забруднення екосистеми, викиди автотранспорту, промислова загазованість, забруднення ґрунтів і повітря важкими металами – все це провокує системне зростання поліорганних патологій серед населення. У таких умовах пошук та обґрунтування застосування високоефективних, малотоксичних та екологічно безпечних засобів рослинного походження, а також створення стійких захисних насаджень є одним із пріоритетних завдань сучасної біологічної та екологічної наук. Інтродуковані до Правобережного Лісостепу України представники родів смородина (*Ribes* L.) та модрина (*Larix* Mill.) мають унікальний комплекс біологічно активних речовин, сформований ними в процесі тривалої еволюції. Проте, традиційне використання різних видів смородин та модрин у фітотерапії та озелененні в Україні тривалий час було обмеженим або взагалі відсутнім. Актуальність нашої роботи полягає в теоретичному та практичному обґрунтуванні концепції міжродового біохімічного та екологічного синергізму. Дослідження доводить, що поєднання компонентів *Ribes* та *Larix* забезпечує значно потужніший лікувальний, захисний та середовищеформуючий ефект, ніж використання кожної рослини окремо. Крім того, вивчення біологічних та екологічних закономірностей формування рослинної біомаси в умовах техногенного стресу (зокрема, унікального для хвойних феномену сезонної листопадності модрин) відкриває абсолютно нові підходи до прогнозування накопичення вторинних метаболітів рослинами. Це розширює можливості їх спільного використання для фіторемедіації та очищення урбанізованих територій від важких металів і газоподібних полютантів та наслідків військової збройної агресії рф. *Ключові слова*: *Ribes* L., *Larix* Mill., Правобережний Лісостеп України, фіторемедіація, міжродовий синергізм, вторинні метаболіти, штучні фітоценози.

Adaptive variability and phytoremediation properties of representatives of the genera *Larix* Mill. and *Ribes* L. under technogenic load. Mordatenko I., Soloshenko V.

The current stage of societal development is characterized by a rapid increase in anthropogenic pressure, chronic environmental stress, and the degradation of environmental quality, particularly in urbanized areas. Military aggression, military – induced pollution of ecosystems, vehicular emissions, industrial gas pollution, and the contamination of soil and air with heavy metals systematically trigger a rise in multi -organ pathologies among the population. Under such conditions, the search for and substantiation of highly effective, low-toxic, and environmentally safe plant-derived agents, as well as the creation of resilient protective plantations, represent a priority task for modern biological and environmental sciences. The representatives of the genera *Ribes* L. and *Larix* Mill., introduced to the Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine, possess a unique complex of biologically active substances shaped throughout their long-term evolution. However, the traditional utilization of various currant and larch species in phytotherapy and urban landscaping in Ukraine has long been limited or entirely absent. The relevance of this study lies in the theoretical and practical substantiation of the concept of intergeneric biochemical and ecological synergism. The research demonstrates that combining components of *Ribes* and *Larix* provides a significantly more potent therapeutic, protective, and environment-shaping effect than the separate use of each plant. Furthermore, studying the biological and ecological regularities of plant biomass formation under technogenic stress (specifically, the phenomenon of seasonal deciduousness in larches, which is unique among conifers) opens up entirely new approaches to predicting the accumulation of secondary metabolites by plants. This expands the possibilities for their combined utilization in phytoremediation and the clearing of urbanized areas from heavy metals, gaseous pollutants, and the consequences of the military armed aggression of the russian federation. *Key words*: *Ribes* L., *Larix* Mill., Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine, phytoremediation, intergeneric synergism, secondary metabolites, artificial phytocoenoses.

Постановка проблеми. Збереження здоров'я відвідувачів дендрологічних парків та інших природно-заповідних територій в умовах сучасного техногенного та екологічного стресу, вимагає постійного пошуку нових видів і перспективними у даному аспекті є рослини різних видів родів смородина та модрина. Смородини – *Ribes* L. (родина *Grossulariaceae* DC.), об'єднують понад 195 таксонів, природно поширених у помірних областях Євразії, Америки та Африки. Найвідомішими у сві-

© Мордатенко І.Л., Солошенко В.С., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

товій флорі видами є *Ribes nigrum* L., *Ribes rubrum* L., *Ribes uva-crispa* L. [1].

Модрина (*Larix* Mill. родина *Pinaceae* Spreng. ex Rudolphi) – за різними класифікаціями налічує від 11 до 14 видів, природно поширених у Північній півкулі. Найвідомішими у світовій флорі видами є *Larix decidua* Mill., *Larix sibirica* Ledeb., *Larix gmelinii* Rupr., *Larix kaempferi* (Lamb.) Carr., *Larix laricina* (Dv. Roi) C. Koch, *Larix polonica* Racib. [1]

Плоди (ягоди), шишки та вегетативні органи цих рослин характеризуються унікальним комплексом біологічно активних речовин (БАР). За своїми лікувальними властивостями вони є високоцінними джерелами вітаміну С, поліфенолів та ессенціальних жирних кислот [2, 3]. Актуальності набуває вивчення біохімічних паралелей між покритонасінними та голонасінними рослинами, зокрема, представниками родів *Ribes* та *Larix*, які мають значні еволюційно-адаптаційні стратегії та унікальний фітохімічний профіль [4, 5].

У Державному дендрологічному парку «Олександрія» НАН України у м. Біла Церква Київської області (Правобережний Лісостеп України) зібрано генофонд 8 видів роду *Ribes* та генофонд 8 видів роду *Larix* [6].

Актуальність дослідження. Серед зростаючої низки негативних факторів, слід виділити системне антропогенне навантаження на ландшафти, поліорганні патології серед населення, хронічний психоемоційний стрес, погіршення екологічних параметрів урбанізованого середовища (загазованість, забруднення важкими металами тощо) [5, 7, 8, 9], тому вивчення та обґрунтування застосування високоефективних, екологічно безпечних і малотоксичних засобів рослинного походження – є одним із пріоритетних завдань сучасної біологічної науки. Таксони родів *Ribes* та *Larix* мають багатий, унікальний склад біологічно активних речовин, який сформувався у процесі тривалої еволюції [3, 10, 11, 12]. Проте, активне використання цих рослин у фітотерапії та озелененні було дещо обмеженим [13, 14]. Актуальність роботи полягає в обґрунтуванні концепції міжродового синергізму – ми пояснюємо та доводимо на практиці, що поєднання компонентів *Ribes* та *Larix* дасть значно потужніший лікувальний ефект, ніж кожна рослина окремо. Крім того, вивчення біологічних та екологічних передумов формування біомаси, зокрема, унікального для хвойних рослин феномену листопадності модрин, окреслює нові підходи до прогнозування накопичення вторинних метаболітів [15, 16, 17].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Представлене дослідження є систематизацією фундаментальних науково-дослідних робіт, які виконувалися на базі Державного дендрологічного парку «Олександрія» НАН України та пов'язане з реалізацією низки пріоритетних завдань сучасної біологічної та екологічної науки. Робота базується на результатах дисертаційного дослідження кандидата біологічних наук І. Л. Мордатенка [10]. «Вивчення біоекологічних особливостей та адаптаційного потенціалу видів роду Модрина (*Larix* Mill.) в умовах Правобережного Лісостепу України». Авторський доробок розширює ці дані в напрямку дослідження та інтегрує з науковими результатами дисертаційного дослідження кандидата біологічних наук В. С. Солошенко (2026 р.) стосовно комплексного аналізу фенологічних спектрів, морфологічних ознак різних видів роду *Ribes* та динаміки накопичення у них біологічно активних речовин (антоціанів, органічних кислот, поліфенолів) [18].

З 2026 року розпочато виконання фундаментальної тематики «Екологічна стійкість та адаптивна мінливість екосистем Державного дендрологічного парку «Олександрія» НАН України в умовах кумулятивної дії дестабілізуючих факторів», серед основних завдань якої буде і оцінка фіторемедіаційного потенціалу деревних рослин у Правобережному лісостепу України.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Упродовж останніх десятиліть наукові дослідження змістилися від простого опису вітамінного складу деревних рослин до вивчення їх молекулярного впливу на організм людини та довкілля. Відомо, що антоціани *Ribes nigrum* діють як природні інгібітори моноамінооксидази-В, покращуючи когнітивні функції та знижуючи ментальну втому людини [19, 20], а також здатні запобігати багатьом хворобам [21, 22]. У роботах І. Л. Мордатенка [10, 23, 24] описано високу екологічну пластичність та стійкість видів роду *Larix* в умовах інтродукції у Правобережному Лісостепу України. Препарати з деревини *Larix sibirica*, *Larix gmelinii*, *Larix decidua* містять флавоноїд дигідрокверцетин (таксифолін) [25] та полісахарид арабіногалактан, які розглядаються сучасною доказовою медициною як еталонні капіляропротектори та імуномодулятори [26, 27]. Потужне коріння дерев модрин зв'язує токсиканти у глибоких шарах ґрунту, «консервує» важкі метали у деревині, виводячи їх з колообігу органічних речовин. Мичкувате коріння кущів смородин утримує важкі метали у верхньому шарі ґрунту, запобігає ерозіям та покращує водний стік, тобто кущі працюють на поверхні, дерева на глибині, а у синергії вони значно повністю блокують міграцію забруднення в екосистемі. Рослини різних видів родів *Ribes* та *Larix* є стійкими до сучасних екологічних викликів, відновлюють деградовані ґрунти, створюючи стійкий, довговічний, фіторемедіаційний та терапевтичний ландшафт.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Метою роботи є комплексна систематизація наукової інформації щодо фіторемедіаційних та фітотерапевтичних властивостей представників родів *Ribes* та *Larix* і оцінка передумов формування їх біолого-екологічної продуктивності.

Наукова новизна дослідження. Вперше на основі системного аналізу та узагальнення наявних теоретичних відомостей, здійснено порівняльну оцінку адаптивної мінливості та фіторемедіаційного потенціалу представників родів *Larix* та *Ribes* в умовах техногенного навантаження. Теоретично обґрунтовано специфіку прояву їх адаптаційних механізмів та перспективність використання таксонів для фіторемедіації в умовах Правобережного Лісостепу України. Вперше теоретично визначено особливості фіторемедіаційного потенціалу різних життєвих форм – хвойних деревних (*Larix*) та листяних кущових (*Ribes*) інтродуцентів.

Методологічне або загальнонаукове значення. Полягає у розробці та впровадженні системного підходу, який об'єднує інструменти ботаніки, екології, фізіології рослин та фармакогнозії для оцінки потенціалу рослинного світу. Робота закладає методологічну основу для порівняльного аналізу біологічних паралелей між абсолютно різними за походженням та життєвими формами рослинами – хвойними деревами (*Larix*) та листяними кущами (*Ribes*). У науковий обіг вводиться методологічний підхід до оцінки рослин не як окремих екологічних одиниць, а як взаємодоповнювальних елементів штучних екосистем. Запропонований підхід базується на системному аналізі світових репозитаріїв, баз даних багаторічного моніторингу колекцій Державного дендрологічного парку «Олександрія» НАН України.

Викладення основного матеріалу. Об'єктом дослідження є біологічні та екологічні особливості рослин різних видів родів *Ribes* та *Larix* з колекції дендропарку «Олександрія» в умовах сучасних кліматичних змін та техногенного навантаження. За літературними джерелами встановлено фітохімічний потенціал їх деревини, листя, хвої та живиці [25, 26, 27]. Методологія дослідження базувалася на системному аналізі фахової літератури, репозитаріїв та міжнародних баз даних (PubMed, Scopus, Google Scholar, Web of Science) за період з 2008 по 2026 роки (табл. 1.).

Порівняння фіторемедіаційного потенціалу рослин роду *Larix* Mill. та *Ribes* виявляє глибокі біологічні паралелі. Унікальною еволюційною ознакою модрин є їх листопадність (хвоєпадність) [10]. Повне щорічне скидання хвої на зиму є фізіологічним механізмом мінімізації транспірації та оптимізації водного балансу рослин в умовах зимового стресу. Головна біологічна паралель між *Larix* та *Ribes* полягає у високому рівні їх адаптивної мінливості. В умовах техногенного забруднення (важкі метали, викиди автотранспорту, діоксид сірки тощо) обидва таксони реагують оптимізацією архітектоніки асиміляційного апарату. У представників обох родів під впливом токсикантів спостерігається тенденція до ксероморфізації структури (зменшення площі листкової пластинки/хвоїнок, потовщення кутикули, регуляція продихового апарату) [28]. Обидва роди характеризуються вираженою фенологічною пластичністю в умовах техногенного забруднення спостерігається зміщення строків фенофаз (оптимізація періоду вегетації), що дозволяє рослинам завершити генеративний або ростовий цикл до моменту критичного літнього піку акумуляції ксеробіотиків. Обидва роди використовують листопад як ефективний спосіб екскреції накопичених за вегетаційний

Таблиця 1

Застосування та використання представників родів *Larix* Mill. та *Ribes* L. в умовах техногенного навантаження

Вид	Адаптивні властивості	Напрямки фіторемедіації	Практичне застосування та моніторингове значення
L. decidua Mill. *L. sibirica* Ledeb.	Висока газостійкість, завдяки щорічному скиданню хвої акумульовані токсиканти не накопичуються роками.	Фітостабілізація та фітоекстракція: Акумулює важкі метали (Pb, Cd, Cu, Zn) у кореневій системі та корі.	Створення захисних лісосмуг навколо промислових підприємств та вздовж автошляхів. Рекультивація відвалів, териконів та кар'єрів.
L. kaempferi (Lamb.) Carr.	Димостійка, стійка у міських умовах.	Очищення повітря: ефективно поглинає діоксид сірки та оксиди азоту.	Хвоя та кора є біоіндикаторами тривалого техногенного забруднення повітря.
R. nigrum L. *R. rubrum* L.	Пластичність кореневої системи та здатність до швидкого вегетативного відновлення.	Фітостабілізація та ризофільтрація: утримує важкі метали у прикореневій зоні (ризосфері), запобігаючи їх вимиванню у ґрунтові води.	Озеленення санітарно-захисних зон підприємств. Використання як чагарникового ярусу для зниження вітрової ерозії на порушених землях.
R. aureum Pursh	Має високу посухостійкість, солестійкість та витривалість до пилового навантаження.	Здатність до акумуляції радіонуклідів (Cs^{137}, Sr^{90}).	Моніторинг локального забруднення ґрунтів (за морфологічними змінами листків та рівнем хлорофілу).

період важких металів та сірки. Рослини скидають баласт забруднювачів разом із хвою/листям, запобігаючи незворотному пошкодженню багаторічних скелетних частин (стовбурів, гілок). Цей механізм зумовлює перерозподіл полютантів, так, накопичені речовини з опадом потрапляють у верхній шар ґрунту під кронами, де завдяки потужній кореневій системі обох рослин відбувається їх подальша локалізація [29].

Аналіз літературних даних підтверджує наявність паралельних біохімічних треків захисту від оксидативного стресу, викликаного техногенними агентами [30, 31]. І у модрин, і у смородин, зв'язування іонів важких металів у цитоплазмі клітин відбувається за рахунок активації глутатіонзалежних шляхів [32]. Обидва роди реагують на забруднення різким збільшенням синтезу фенольних сполук у бар'єрних тканинах [33, 34]. У рослин роду *Larix* це проявляється зміною якісного складу живиці, у рослин роду *Ribes* – накопиченням антоціанів та флавоноїдів у листках, що виконують роль оптичних та хімічних протекторів. Леткі фітонцидні виділення рослин сприяють детоксикації приземного шару атмосфери шляхом зв'язування та інактивації деяких газоподібних полютантів (озону, оксидів азоту та сірки), що суттєво підвищує загальний фіторемедіаційний ефект штучних насаджень [35].

Вегетативні органи обох рослин (бруньки, листя смородин, хвоя та живиця модрин) насичені моно- та сесквітерпеноїдами (борнеол, лимонен, карен тощо) та фітонцидами. Терпеноїди стабілізують клітинні мембрани та беруть участь у регенерації тканин при механічних чи хімічних пошкодженнях, наприклад, живиця модрин забезпечує швидку ізоляцію техногенних мікротравм кори та пагонів [36, 37].

Особливу роль у забезпеченні толерантності до екологічного стресу відіграє антиоксидантний статус асиміляційного апарату. За даними літературних джерел, хвоя модрини під час активної вегетації за вмістом вітаміну С не поступається світовим еталонам [38, 39]. Аскорбінова кислота є ключовим низькомолекулярним антиоксидантом, який нівелює дію активних форм кисню, що масово утворюються в клітинах рослин під впливом ксенобіотиків та важких металів [40, 41, 42].

Хвоя модрин характеризується інтенсивним мінеральним обміном, зокрема, містить у 9 разів більше фосфору, ніж хвоя *Pinus sylvestris* L. Оскільки фосфор є основою енергетичного обміну (АТФ) та входить до складу фосфоліпідів біомембран, такий високий його вміст забезпечує потужний енергетичний резерв для підтримання репараційних процесів у клітинах модрини, що функціонують в умовах хронічного техногенного навантаження.

Подібний механізм інтенсифікації фосфорного та вуглеводного обміну в умовах стресу притаманний і представникам роду *Ribes,* що підтверджує спільність їх фізіологічних адаптацій [43, 44]. Ажурні крони модрин добре і легко поглинають повітряні маси, послаблюють силу вітру, оптимізують мікроклімат, що корелює з високою газо- та димостійкістю обох родів в урбанізованому середовищі [10, 45].

Враховуючи те, що дерева модрин і кущі смородин займають різні просторові яруси (дерево та кущ), але мають подібну екологічну пластичність і однаковий ритм скидання листя/хвої, їх доцільно використовувати разом у багатоярусних фіторемедіаційних посадках, наприклад, вздовж автомагістралей або навколо промислових зон Правобережного Лісостепу, для створення стійких штучних фітоценозів

Висновки. За даними проведених теоретичних досліджень, з'ясовано синергічний ефект поєднання двох родів *Larix* та *Ribes*. Спільне використання речовин з деревини різних видів модрин та плодів і листя різних видів смородин обумовлює значно сильніший лікувальний ефект, ніж кожна з рослин окремо. Поєднання флавоноїдів (дигідрокверцетину) та антоціанів посилює захист судин та клітин від руйнування. Сезонна листопадність рослин роду *Larix* є унікальним явищем для хвойних та фізіологічним захистом від несприятливих зимових умов. Під впливом техногенного забруднення у рослин обох родів оптимізується будова хвої та листя (зменшується площа листової поверхні, потовщується захисний шар). За умов техногенного забруднення рослини діють синергічно на різних рівнях: глибока та потужна коренева система модрин вбирає та «консервує» важкі метали у деревині, поверхнева, мичкувата коренева система смородин утримує токсиканти у верхньому шарі ґрунту, запобігаючи ерозії та потраплянню токсикантів у дощові стоки. Таким чином блокується поширення забруднених речовин в екосистемі.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати дослідження можна використати як теоретичну платформу для фармацевтичних підприємств України щодо створення комбінованих засобів поліорганної дії, спрямованих на захист судин, зміцнення імунітету та загальне відновлення організму. Спільні багатоярусні посадки з модрин (верхній ярус) та смородин (нижній ярус) рекомендовано створювати вздовж залізниць, великих автошляхів та промислових майданчиків. Висока здатність ажурних крон рослин роду *Larix* поглинати повітряні маси, послаблюючи вітер та виділяючи, як і рослини роду *Ribes*, леткі фітонциди і терпеноїди, дозволяє рекомендувати їх для використання у «терапевтичних ландшафтах» (санаторії, лікарні, міські зони відпочинку). Узагальнені дані безпосередньо інтегровані до фундаментальної наукової теми дендропарку «Олександрія» НАН України щодо оцінки стійкості екосистем до сучасних кліматичних змін та техногенного стресу, забезпечуючи базу для довгострокового екологічного моніторингу.

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

Література

1. POWO: https://powo.science.kew.org/ (date of access 11.07.2026)
2. Uttra A., Alamgeer M., Shahzad M. et al. Ribes orientale: A novel therapeutic approach targeting rheumatoid arthritis with reference to pro-inflammatory cytokines, inflammatory enzymes and anti-inflammatory cytokines. *Journal of Ethnopharmacology.* 2019. Vol. 237. P. 92–107. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jep.2019.03.019 (date of access 10.07.2026)
3. Soloshenko V. Comparative assessment of the content of vitamin C and carbohydrates in the fruits of species of the genus *Ribes* L. *Plant Introduction*. 2025. P. 1520. DOI: https://doi.org/10.46341/PI2025003 (date of access 10.07.2026)
4. Cortez R. E., Gonzalez de Mejia E. Blackcurrants (*Ribes nigrum*): A Review on Chemistry, Processing, and Health Benefits. *Journal of Food Science*. 2019. Vol. 84. no. 9. P. 2387–2401. DOI: https://doi.org/10.1111/1750-3841.14781 (date of access 10.07.2026)
5. Yadav S., Sharma A., Bishnoi S. et al The Role of Anthocyanins in Cardiovascular Health : A Review. *Current Cardiology Reviews*. 2026. Vol. 22. no. 2. Art. e1573403X372621. DOI: https://doi.org/10.2174/011573403X372621250716123921 (date of access 10.07.2026)
6. Каталог деревних рослин дендрологічного парку «Олександрія» Національної академії наук України. за ред. С. І. Галкіна. Біла Церква : ТОВ «Білоцерківдрук», 2013. 64 с.
7. Willems M. E. T., Myers S. D., Cook M. D., Gault M. L. Effect of New Zealand Sujon blackcurrant on cardiovascular responses during cycling in triathletes. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*. 2014. Vol. 11, suppl. 1. Art. P11. DOI: https://doi.org/10.1186/1550-2783-11-S1-P11 (date of access 10.07.2026)
8. Wu Y., Zhao L., Gu L. et al. Renoprotective activity of *Ribes diacanthum* pall (RDP) against inflammation in cisplatin-stimulated mice model and human renal tubular epithelial cells. *Journal of Ethnopharmacology*. 2022. Vol. 283. Art. 114696. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jep.2021.114696 (date of access 10.07.2026)
9. Staszowska-Karkut M., Chilczuk B., Materska M. et al. Phenolic Compounds in Fractionated Blackcurrant Leaf Extracts in Relation to the Biological Activity of the Extracts. *Molecules*. 2023. Vol. 28. no. 22. Art. 7459. DOI: https://doi.org/10.3390/molecules28227459 (date of access 10.07.2026)
10. Мордатенко І. Л. Біоекологічні особливості видів роду *Larix* Mill. у зв'язку з їх інтродукцією в Правобережному Лісостепу України : автореф. дис. … канд. біол. наук : 03.00.05. Нац. бот. сад імені М. М. Гришка НАН України. Київ, 2010. 16 с.
11. Galkina V. Little known species of currant (*Ribes* L.) as a perspective vitamin and medicinal plants in the Forest Steppe of the Right−Bank of the Ukraine. *The scientific proceedings of the International network AgroBioNet*. 2016. P. 91−94. URL:https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/bitstream/lib/25184/1/Biodiversity%20after%20the%20Chernobyl%20Accident.%20Part%20II.pdf#page=91.
12. Galkina V., Dojko N., Bojko N., Mordatenko I. The beautifully fruiting woody plants on the landscapes of the "Alexandria" Arboretum of the NAS of the Ukraine. *Conversation of Plant Diversity* : *International Scientific Symposium*, 5th edition (Chişinău, Republic of Moldova, 13 June 2017). Chişinău, 2017. P. 24.
13. Téglás T., Mihok E., Cziáky Z. et al. The Flavonoid Rich Black Currant (*Ribes nigrum*) Ethanolic Gemmotherapy Extract Elicits Neuroprotective Effect by Preventing Microglial Body Swelling in Hippocampus and Reduces Serum TNF-α Level: Pilot Study. *Molecules*. 2023. Vol. 28, no. 8. Art. 3571. DOI: https://doi.org/10.3390/molecules28083571 (date of access 10.07.2026)
14. Ștefănescu R., Boda F., Sebestyen M. et al. Pharmacognostic Evaluation and Antioxidant Profiling of Five Varieties of *Ribes nigrum* Grown in Romania. *Plants*. 2025. Vol. 14, no. 11. Art. 1604. DOI: https://doi.org/10.3390/plants14111604 (date of access 10.07.2026)
15. Oprea E., Radulescu V., Balotescu C. et al. Chemical and biological studies of *Ribes nigrum* L. buds essential oil. BioFactors. 2008. Vol. 34. no. 1. P. 3–12. DOI: https://doi.org/10.1002/biof.5520340102 (date of access 10.07.2026)
16. Ohguro H., Ohguro I., Yagi S. Effects of black currant anthocyanins on intraocular pressure in healthy volunteers and patients with glaucoma. *Journal of Ocular Pharmacology and Therapeutics*. 2013. Vol. 29. no. 1. P. 61–67. DOI: https://doi.org/10.1089/jop.2012.0071 (date of access 10.07.2026)
17. Miladinović B., Randjelović M., Djordjević B. et al. Comparative Analysis of Anthocyanins and Vitamin C Content, Antioxidant Potential, and Antimicrobial Activity of Eight Black Currant (*Ribes nigrum* L.). Varieties Juices. *Chemistry & Biodiversity.* 2025. Vol. 22. no. 12. Art. e01614. DOI: https://doi.org/10.1002/cbdv.202501614 (date of access 10.07.2026)
18. Солошенко В. С. Види роду *Ribes* L. у Правобережному Лісостепу України : інтродукція, біолого-екологічні особливості, перспективи використання : автореф. дис. … канд. біол. наук : 03.00.05. Нац. бот. сад імені М. М. Гришка НАН України. Київ, 2025. 21 с.
19. Anthony W., Watson C., Haskell-Ramsay D. F. et al. Acute supplementation with blackcurrant extracts modulates cognitive functioning and inhibits monoamine oxidase-B in healthy young adults. *Journal of Functional Foods*. 2015. Vol. 17. P. 524–539. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.06.005 (date of access 10.07.2026)
20. Chen Y. N., Xiong Z. E., Wen X. et al. Anthocyanins in the treatment of Alzheimer's disease: a systematic review and meta-analysis of animal studies. *Nutritional Neuroscience*. 2025. P. 1–18. DOI: https://doi.org/10.1080/1028415X.2025.2578641 (date of access 10.07.2026)
21. Nanashima N., Horie K., Maeda H. et al. Blackcurrant Anthocyanins Increase the Levels of Collagen, Elastin, and Hyaluronic Acid in Human Skin Fibroblasts and Ovariectomized Rats. *Nutrients.* 2018. Vol. 10. no. 4. Art. 495. DOI: https://doi.org/10.3390/nu10040495 (date of access 10.07.2026)
22. Nanashima N., Horie K., Yamanouchi K. et al. Blackcurrant (*Ribes nigrum*) Extract Prevents Dyslipidemia and Hepatic Steatosis in Ovariectomized Rats. *Nutrients.* 2020. Vol. 12. no. 5. Art. 1541. DOI: https://doi.org/10.3390/nu12051541. (date of access 10.07.2026)
23. Мордатенко І. Л. Використання модрин в народному господарстві. *Теоретичні та прикладні аспекти інтродукції рослин і зеленого будівництва*. Біла Церква. 2003. С. 113–115.

24. Мордатенко І. Л. Підсумки інтродукції видів роду Larix Mill. у Правобережному Лісостепу України. *Науковий вісник НАУ*. 2006. № 100. С. 24–27.
25. Yan X., Wang K., Zheng K. et all. Efficient organogenesis and taxifolin production system from mature zygotic embryos and needles in larch. *For Res (Fayettev)*. 2023 Feb 23;3:4. doi: 10.48130/FR-2023-0004. PMID: 39526270; PMCID: PMC11524243 (date of access 10.07.2026)
26. Batista J. V. C., Uecker A., Holandino C. et all. Scoping Review on the Therapeutic Potential of Resin From the Species *Larix decidua* Mill. (Pinaceae) to Treat Ulcerating Wounds. *Front Pharmacol*. 2022 Jun 3; 13:895838. doi: 10.3389/fphar.2022.895838. PMID: 35721139; PMCID: PMC9204203. (date of access 10.07.2026)
27. Batista J. V.C., Melo M. N. O., Holandino C. et all. Characterization of *Larix decidua* Mill. (Pinaceae) oleoresin's essential oils composition using GC-MS. *Front Plant Sci.* 2024 Jan 8;14:1331894. doi: 10.3389/fpls.2023.1331894. PMID: 38259911; PMCID: PMC10801252. (date of access 10.07.2026)
28. Staszewski T., Kubiesa P., Szdzuj J. Anatomical and morphological changes in *Larix decidua* Mill. needles induced by industrial air pollution. *Water, Air, and Soil Pollution*. 2008. 192(1). P. 115–124.
29. Rademacher P. Atmospheric Heavy Metals and Sulfur Dioxide : Morphological and Anatomical Responses of Woody Shrubs (*Ribes spp., Sambucus spp.*). *European Journal of Forest Research*. 2003. 122(3). P. 11–321.
30. Бессонова В. П. Атлас симптомів пошкодження рослин токсичними газами. Дніпропетровськ : ДДУ, 2001. 188 с.
31. Коршиков І. І. Адаптація рослин до умов техногенно забрудненого середовища. Донецьк : Лебідь, 1996. 238 с.
32. Schützendübel A., Polle A. Plant responses to heavy metal stress: implications for antioxidants, glutathione and phytochelatins in woody taxa. *Plant, Cell & Environment.* 2002. 25(6). P. 759–777.
33. Michalak A. Phenolic compounds and their antioxidant activity in plants growing under heavy metal stress. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2006. 15(4). P. 523–530.
34. Geron C., Owen S., Guenther A., Greenberg J. Volatile organic compounds from vegetation in polluted environments: *Terpenoid and phenolic responses in conifers. Atmospheric Environment*. 2006. 40. P. 145–161.
35. Calfapietra C., Fares S., Manes F., Morani A., Sgrigna G., Loreto F. Role of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOC) emitted by urban trees on ozone concentration in cities: A review. *Environmental Pollution.* 2013. 183. P. 71–80.
36. Phillips M. A., Croteau R. B. Resin-based defenses in conifers. *Trends in Plant Science*. 1999. 4(5). P. 184–190.
37. Tholl D. Terpene synthases and the regulation, function and evolution of the terpene diversity in plants. *New Phytologist*. 2006. 172(1), P. 1–20.
38. Коршиков І. І., Красношлик Ю. В., Лаптєва О. В. Антиоксидантний комплекс хвойних рослин за умов техногенного навантаження. *Український ботанічний журнал*. 2008. Т. 65. № 4. С. 584–592.
39. Smirnoff N. Ascorbic acid: metabolism and functions of a multi-facetted molecule. *Current Opinion in Plant Biology*. 2000. Vol. 3. No. 3. P. 229–235.
40. Бараненко В. В. Антиоксидантний захист рослин за дії важких металів. *Фізіологія і біохімія культурних рослин*. 2006. Т. 38, № 2. С. 134–143.
41. Gill S. S., Tuteja N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2010. Vol. 48. No. 12. P. 909–930.
42. Noctor G., Foyer C. H. Ascorbate and glutathione: keeping active oxygen under control. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*. 1998. Vol. 49. No. 1. P. 249–279.
43. Шлапак В. П., Мусієнко С. І., Козаченко П. І. Екологічні особливості мінерального живлення та накопичення елементів у хвої представників роду *Larix* Mill. в умовах інтродукції. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2011. Вип. 21.15. С. 24–31.
44. Gower S. T., Richards J. H. Larches: Deciduous conifers in a cold, nutrient-poor environment. *BioScience*. 1990. Vol. 40, No. 11. P. 818–826.
45. Солошенко В. С. Газостійкість та димостійкість представників роду *Ribes* L. та *Berberis* L. в умовах м. Біла Церква. *Рослини та урбанізація* : матеріали XIV міжнародна наук. – практ. конференція (м. Дніпро, 3 лютого 2025 р.). Дніпро. 2025. С. 137.

Дата першого надходження статті до видання: 16.07.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

УДК 502.4:37.003:004
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.51

ГРОМАДЯНСЬКА НАУКА ЯК ІНСТРУМЕНТ ЕКОПРОСВІТНИЦЬКОЇ ДІЯЛЬНОСТІ ПРИРОДООХОРОННИХ УСТАНОВ: ВІД ЗБОРУ ДАНИХ ДО ФОРМУВАННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ СВІДОМОСТІ

Терпеливець С.І. (orcid.org/0009-0003-2867-5149)
Карпатський національний університет імені Василя Стефаника
вул. Шевченка, 57, 76000, Івано-Франківськ
stanislav.terpelyvets.25@cnu.edu.ua

У статті розглядається концептуальний зв'язок між громадянською наукою (citizen science) та екопросвітницькою діяльністю природоохоронних установ. На основі аналізу наукової літератури, міжнародного досвіду та специфіки Карпатського регіону України обґрунтовано, що цифрові платформи громадянської науки – насамперед iNaturalist – виконують дуальну функцію: поряд із науковою (збір і верифікація біологічних даних) вони реалізують виражений освітньо-виховний вплив на суспільство. Проаналізовано основні теоретичні моделі участі громадян у наукових дослідженнях, розкрито механізми формування екологічної свідомості через практику спостережень. Виявлено, що участь у проєктах громадянської науки сприяє розвитку наукової грамотності, посилює емоційний зв'язок з природою та формує просоціальну екологічну поведінку. Запропоновано теоретичну модель інтеграції громадянської науки в систему екопросвітницької роботи природоохоронних установ Карпатського регіону, що включає три виміри: когнітивний, афективний та поведінковий. Обґрунтовано необхідність розробки спеціалізованих освітніх протоколів для природоохоронних установ, що поєднують науковий моніторинг із цілеспрямованим формуванням екологічної компетентності різних категорій зацікавлених сторін. Теоретичну основу дослідження становлять концепції ситуативного навчання, трансформативного навчання та психології відновного природного досвіду, які пояснюють механізми формування когнітивного, афективного та поведінкового компонентів екологічної свідомості учасників спостережень. На основі аналізу міжнародного досвіду виокремлено три моделі інтеграції громадянської науки в роботу природоохоронних установ – «інструментального залучення», «структурованого натуралізму» та «наукового партнерства», а також фактори їх успішного впровадження. Практичне значення дослідження полягає у розробці трирівневої моделі екопросвітницьких програм («Відкриття», «Залучення», «Партнерство»), яка враховує специфіку природоохоронних установ Карпатського регіону – Карпатського біосферного заповідника, національних природних парків «Гуцульщина», «Синевир» та «Сколівські Бескиди» і може бути використана ними при плануванні екопросвітницької роботи в умовах ресурсних обмежень воєнного часу. *Ключові слова:* громадянська наука, iNaturalist, природоохоронні установи, Карпатський регіон, екологічна освіта, біорізноманіття.

Citizen science as a tool for eco-educational activities of nature conservation institutions: from data collection to forming environmental awareness. Terpelyvets S.

The article examines the conceptual relationship between citizen science and eco-educational activities of nature conservation institutions. Based on an analysis of scientific literature, international experience, and the specifics of the Ukrainian Carpathian region, it is argued that digital citizen science platforms – primarily iNaturalist – serve a dual function: alongside their scientific role (collecting and verifying biological data), they exert a pronounced educational and formative influence on society. The main theoretical models of public participation in scientific research are analyzed, and the mechanisms for developing environmental awareness through observation practices are explored. Participation in citizen science projects is found to promote scientific literacy, strengthen emotional connection with nature, and foster prosocial environmental behavior. A theoretical model for integrating citizen science into the eco-educational activities of Carpathian nature conservation institutions is proposed, encompassing three dimensions: cognitive, affective, and behavioral. The necessity of developing specialized educational protocols for nature conservation institutions that combine scientific monitoring with targeted development of environmental competence among different interested parties is substantiated. The theoretical foundation of the study comprises the concepts of situated learning, transformative learning, and the psychology of restorative nature experience, which explain the mechanisms underlying the cognitive, affective, and behavioral components of environmental awareness among observation participants. Based on an analysis of international experience, three models of integrating citizen science into the work of nature conservation institutions are identified – «instrumental engagement,» «structured naturalism,» and «scientific partnership» – along with the factors underlying their successful implementation. The practical significance of the study lies in the development of a three-level model of eco-educational programs («Discovery,» «Engagement,» «Partnership») that accounts for the specifics of nature conservation institutions of the Carpathian region – the Carpathian Biosphere Reserve and the Hutsulshchyna, Synevyr, and Skolivski Beskydy national nature parks – and can be directly applied by them when planning eco-educational work under the resource constraints of wartime. *Key words:* citizen science, iNaturalist, nature conservation institutions, Carpathian region, environmental education, biodiversity.

© Терпеливець С.І., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Вступ. Зміни клімату, масштабна втрата біорізноманіття та наростаючі екологічні кризи зумовлюють необхідність не лише вдосконалення наукових методів моніторингу природного середовища, але й принципової трансформації екологічної свідомості суспільства. У цьому контексті природоохоронні установи – національні природні парки, біосферні заповідники, заказники – дедалі частіше розглядаються не просто як осередки наукових досліджень чи резервати дикої природи, а як повноцінні центри екологічної освіти та просвіти. Водночас класичні форми екопросвітницької роботи – лекції, екскурсії, виставки – поступово втрачають свою ефективність, часто серед молоді, на тлі розвитку цифрових технологій та зміни моделей інформаційного споживання.

У цих умовах громадянська наука (citizen science) – організована практика залучення непрофесіоналів до реальних наукових спостережень – набуває значення принципово нового педагогічного інструменту. Цифрові платформи для збору біологічних даних, передусім iNaturalist, дають змогу будь-якому охочому зробити фотографію рослини чи тварини, отримати автоматичне визначення виду та долучити своє спостереження до глобальної наукової бази даних. При цьому, як показує зростаючий масив досліджень, участь у таких проєктах не обмежується лише «збором даних» – вона суттєво змінює ставлення учасників до природного середовища, рівень їхньої екологічної грамотності та готовність до просоціальної поведінки.

Особливої актуальності ця тема набуває в контексті природоохоронних установ Карпатського регіону України. Регіон, де зосереджені, наприклад, Карпатський біосферний заповідник, НПП «Гуцульщина», НПП «Синевир», НПП «Сколівські Бескиди», НПП «Карпатський» тощо, відзначається унікальним біорізноманіттям і водночас активним туристичним потоком, що формує природну аудиторію для екопросвітницьких заходів. Попри це, системного осмислення потенціалу громадянської науки саме як педагогічного та просвітнього інструменту природоохоронних установ в українській науковій літературі досі бракує – це і є та невирішена частина загальної проблеми, якій присвячена стаття. Наявні публікації розглядають citizen science або як суто науковий інструмент моніторингу, або як загальноосвітню практику поза прив'язкою до конкретних завдань природоохоронних установ.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями полягає в тому, що робота виконана в межах дисертаційного дослідження на тему «Екопросвітницька діяльність природоохоронних установ Карпатського регіону: сучасний стан і перспективи» та безпосередньо кореспондується із завданнями, визначеними Рамковою конвенцією про охорону та сталий розвиток Карпат і державною політикою у сфері формування екологічної свідомості населення, зокрема, потребою природоохоронних установ у ресурсоощадних, але науково обґрунтованих інструментах екологічної просвіти в умовах воєнного часу та пов'язаних із ним кадрових і фінансових обмежень [6].

Наукова новизна дослідження полягає в тому, що вперше у вітчизняній науковій літературі здійснено системний теоретичний синтез моделей громадянської науки та механізмів формування екологічної свідомості (когнітивного, афективного, поведінкового) стосовно саме природоохоронних установ, а також запропоновано авторську трирівневу модель інтеграції громадянської науки в екопросвітницьку діяльність, адаптовану до умов і ресурсних можливостей природоохоронних установ Карпатського регіону.

Метою статті є теоретичне обґрунтування концепції громадянської науки як інструменту екопросвітницької діяльності природоохоронних установ: аналіз механізмів формування екологічної свідомості через практику біологічних спостережень та розробка теоретичної моделі інтеграції цифрових платформ у систему екопросвітницької роботи природоохоронних установ Карпатського регіону.

Реалізація мети передбачає вирішення таких завдань: 1) систематизувати теоретичні підходи до розуміння громадянської науки як освітнього феномену; 2) проаналізувати механізми формування екологічної свідомості в процесі участі у проєктах громадянської науки; 3) розглянути міжнародний досвід інтеграції citizen science в екопросвітницьку практику природоохоронних установ; 4) запропонувати теоретичну модель інтеграції громадянської науки в систему екопросвітницької роботи природоохоронних установ Карпатського регіону.

Аналіз останніх досліджень і публікацій: громадянська наука між наукою і освітою. Концепція громадянської науки пройшла значну еволюцію від початкового її розуміння як простого «краудсорсингу даних» до її осмислення, як комплексного соціокультурного явища. Bonney et al. у програмній роботі, що заклала основи сучасного розуміння citizen science, визначили її як практику, що розширює наукові знання та наукову грамотність суспільства [3]. Автори виокремили два взаємопов'язані виміри: виробництво наукового знання та освітній вплив на учасників – і наголосили, що обидва є рівноправними цілями добре спланованих проєктів. У подальшій роботі ці ж автори показали, що участь у громадянській науці позитивно позначається на загальному розумінні суспільством наукового методу [4].

Ширша класифікація, запропонована Shirk et al. виокремлює кілька моделей участі залежно від ступеня залучення громадян: контрактна (учасники збирають дані за наперед розробленим науковцями протоколом), спільна (учасники беруть участь в аналізі даних), collaborative (спільне про-

єктування дослідження) та колегіальна (учасники і науковці – рівноправні партнери) [22]. В контексті більшості платформ природничого спрямування, включаючи iNaturalist, домінує контрактна модель: волонтери здійснюють спостереження за власним розсудом, проте в межах технічного протоколу платформи (фотофіксація, геотегування, ідентифікація виду). Попри нижчий рівень формальної участі, саме ця модель виявилась найбільш масштабованою і доступною для широкої аудиторії.

Теоретичне осмислення освітнього виміру громадянської науки сформувалося на перетині кількох наукових традицій. По-перше, це теорія ситуативного навчання (situated learning), розроблена Lave & Wenger, відповідно до якої найефективніше навчання відбувається в реальній соціальній практиці, а не в абстрактних навчальних ситуаціях [16, с. 29]. Участь у проєкті громадянської науки є яскравим прикладом такого «навчання через участь»: новачки поступово переходять від периферійних ролей (просте фотографування) до більш центральних (верифікація спостережень інших, участь у спеціалізованих проєктах). По-друге, теорія трансформативного навчання (transformative learning) – описує процеси, через які набутий досвід змінює базові переконання людини, в тому числі щодо її ставлення до природного середовища [19]. Нарешті, концепція «науки як практики» (science-as-practice) – підкреслює, що розуміння наукового методу формується не через читання підручників, а через реальне «наукове діяння» – саме те, що пропонує громадянська наука [15, с. 23].

Окрему теоретичну нішу займає концепція «громадянської наукової грамотності» (citizen science literacy), запропонована Phillips et al. [20]. Автори доводять, що регулярна участь у проєктах типу iNaturalist формує специфічний тип компетентності, що поєднує: (а) таксономічні знання (вміння ідентифікувати місцеві види); (б) розуміння наукового методу (спостереження, верифікація, відтворюваність); (в) просторове мислення (розуміння поширення видів, біогеографічних закономірностей); (г) цифрову компетентність (робота з мобільними застосунками, геопросторовими даними); (д) співтовариський вимір (взаємодія зі спільнотою ідентифікаторів).

Важливим теоретичним внеском є також роботи в галузі психології природи (nature psychology), передусім Kaplan & Kaplan та їхня теорія відновного досвіду (restorative experience theory) [14, с. 177-200]. Відповідно до неї, безпосередній досвід взаємодії з природою – котрий стає більш осмисленим і структурованим завдяки платформам громадянської науки – має виражений відновний та емоційний ефект, що у свою чергу посилює екологічну прив'язаність (place attachment) і готовність до природоохоронної поведінки. Цей ланцюжок «досвід – емоція – поведінка» є ключовим для розуміння того, чому громадянська наука може бути ефективнішою за традиційні форми екопросвіти.

Механізми формування екологічної свідомості через участь у проєктах громадянської науки. Формування екологічної свідомості є складним психолого-педагогічним процесом, що включає когнітивний, афективний та поведінковий компоненти. Розглянемо, яким чином участь у проєктах громадянської науки впливає на кожен із них.

Когнітивний вимір. Участь у біологічних спостереженнях вимагає і водночас формує специфічні знання про природне середовище. Дослідження Brossard et al. продемонструвало, що учасники проєкту спостережень за птахами після одного сезону суттєво збільшили свої знання про досліджувані види, навіть без цілеспрямованого навчання – просто через практику ідентифікації [5]. Evans et al. показали, що цей ефект є стійким і перевищує результати традиційних освітніх підходів для рівнозначних часових витрат [8]. Для платформ, що використовують алгоритмічну підтримку ідентифікації, таких як iNaturalist, навчальний ефект додатково посилюється завдяки миттєвому зворотному зв'язку: спостерігач одразу бачить можливі варіанти визначення виду та може порівняти свої припущення з пропозиціями алгоритму і спільноти [18].

Афективний вимір. Зв'язок між безпосереднім досвідом спостереження живих організмів та емоційним ставленням до природи є добре задокументованим у науковій літературі. Jordan et al. у широкому огляді наукових досліджень встановили, що учасники проєктів громадянської науки демонструють зростання «почуття дива» (sense of wonder) щодо живого світу, підвищення рівня «природної прив'язаності» та зниження «природного відчуження» порівняно з контрольними групами [13]. Особливо значущим є те, що цей ефект реєструється навіть у учасників, які обирають ділянки поблизу міст або парків – тобто не потребує перебування у «незайманій» дикій природі. Це принципово важливо для природоохоронних установ Карпатського регіону, які прагнуть залучати широкі кола міського населення через туристичні та рекреаційні програми.

Поведінковий вимір. Зміна реальної поведінки – найскладніший для вимірювання та формування компонент екологічної свідомості. Тим не менше, наявні дані свідчать про позитивний ефект участі в проєктах громадянської науки. Trumbull et al. задокументували, що учасники тривалих програм спостережень із більшою ймовірністю повідомляли про зміни у власній поведінці щодо природи, зростання зацікавленості в природоохоронних ініціативах та збільшення часу, проведеного на відкритому повітрі [25]. У ширшому контексті Toomey & Domroese відзначили зв'язок між тривалою участю в проєктах натуралістичних спостережень та підвищеною громадянською активністю в екологічних питаннях – зокрема, участю у громадських слуханнях, підтрим-

кою природоохоронних ініціатив, волонтерством на природоохоронних територіях [24].

Суттєвим механізмом, що пов'язує всі три виміри, є соціальна ідентичність. Участь у спільноті натуралістів – з її специфічними нормами, практиками та цінностями – поступово трансформує самоідентифікацію учасника: від «звичайної людини, яка іноді фотографує природу» до «натураліста», «спостерігача», «захисника природи». Цей процес, описаний у рамках теорії соціальної ідентичності Tajfel & Turner є ключовим для довгострокового збереження просоціальної екологічної поведінки: людина діє відповідно до тієї соціальної ролі, яку вона прийняла як свою власну [23, с. 33-47].

Міжнародний досвід інтеграції громадянської науки в екопросвітницьку практику природоохоронних установ. Аналіз міжнародного досвіду демонструє різноманітність моделей інтеграції платформ громадянської науки в екопросвітницьку діяльність природоохоронних установ – від простого використання iNaturalist як «застосунку для туристів» до системних освітніх програм із чітко визначеними педагогічними цілями та методами оцінювання.

Модель «інструментального залучення» є найпоширенішою і найпростішою у впровадженні. Природоохоронна установа реєструє офіційний проєкт на платформі iNaturalist, розміщує QR-коди на інформаційних стендах та заохочує відвідувачів завантажувати застосунок. Перевагою є мінімальні витрати ресурсів, а недоліком – відсутність системного педагогічного впливу. Більшість учасників залишаються на рівні разового досвіду без формування стійкої зацікавленості чи глибших знань. Прикладом є частина польських національних парків, де iNaturalist позиціонується переважно як атракція для відвідувачів [7].

Модель «структурованого натуралізму» передбачає розробку тематичних польових маршрутів із завданнями для спостереження на платформі. Відвідувачі отримують не просто заклик «фотографуйте природу», а конкретний освітній сценарій: «сьогодні ми досліджуємо рослини вологих місцезростань», «знайдіть і сфотографуйте три різних види папоротей» тощо. Такий підхід реалізований у ряді заповідників Великої Британії та Нідерландів і демонструє значно кращі показники залученості та повторних відвідувань порівняно з інструментальною моделлю. Педагогічний ефект посилюється через цілеспрямоване формування спостережливості та таксономічного мислення. Показовим прикладом є досвід французького природного заповідника Рам'єр, де впровадження платформи Pl@ntNet, функціонального аналога iNaturalist для рослин, забезпечило системний моніторинг флори силами відвідувачів без залучення додаткових польових науковців. При цьому учасники демонстрували стійке зростання знань про місцеву рослинність у ході повторних візитів [2]. Цей приклад підкреслює, що освітній та науковий результати citizen science є взаємопосилювальними, а не конкурентними.

Модель «наукового партнерства» є найбільш розвиненою і застосовується переважно для освітніх програм зі школярами та студентами. Учасники не просто збирають дані, а беруть участь у реальному науковому процесі: разом із науковцями установи визначають пріоритетні таксономічні групи для дослідження, аналізують динаміку спостережень за певний період, обговорюють методологічні проблеми ідентифікації. У США та Канаді ця модель успішно реалізована в рамках програм «Citizen Science in National Parks», де студенти університетів проводять сезонні моніторингові сесії на основі даних iNaturalist. Це, по суті, реалізація найвищого рівня «participation matrix» за Shirk et al. [22] і дає найбільш виражені результати у формуванні всіх трьох компонентів екологічної свідомості.

Окрему увагу заслуговує досвід використання bioblitz (масових одноденних акцій обліку біорізноманіття) як форми екопросвітницької роботи. BioBlitz, організовані за підтримки iNaturalist, об'єднують науковців, педагогів, студентів, туристів та місцевих жителів у спільній дії протягом 24 годин. Дослідження Ballard et al. показали, що учасники bioblitz демонструють значно вищі показники розвитку «відчуття причетності до науки» порівняно з учасниками традиційних екскурсій тієї самої тривалості [1]. Крім того, bioblitz мають виражений комунітарний ефект: вони формують соціальні зв'язки між учасниками навколо спільного інтересу до природи.

Аналіз міжнародного досвіду дозволяє виокремити кілька спільних факторів успіху інтеграції громадянської науки в екопросвіту: наявність підготовленого персоналу (модераторів та ідентифікаторів); чіткі педагогічні цілі, проєкти громадянської науки формульовані в тому числі мовою освітніх результатів (а не лише наукових показників); систематичний зворотний зв'язок з учасниками щодо наукового значення їхніх спостережень; поєднання цифрового (платформа) та «живого» (інтерпретаційні програми) компонентів.

Специфіка Карпатського регіону: методологічне та практичне значення для природоохоронних установ. Карпатський регіон України характеризується рядом особливостей, що водночас є перевагами і викликами для інтеграції громадянської науки в екопросвітницьку діяльність його природоохоронних установ.

З точки зору потенціалу, ключовою перевагою є значний та різноманітний людський потік. Туристи, відпочиваючі, мешканці гірських громад, а в умовах воєнного стану – ще й численні внутрішньо переміщені особи, що обрали захід України як місце проживання – формують широку і соціально різноманітну аудиторію. При цьому, як зафіксовано

у даних iNaturalist, Карпатський регіон демонструє зростання кількості спостережень навіть на тлі воєнного конфлікту, що свідчить про збереження природного інтересу населення до живої природи [10; 11]. Другою перевагою є виняткове біорізноманіття регіону: понад 3500 видів вищих рослин, близько 450 видів хребетних тварин, а також значна частка ендемічних та реліктових видів, включаючи занесені до Червоної книги України. Висока видова насиченість забезпечує постійне «відкриття нового» для учасників спостережень, що є потужним мотиваційним чинником. Третя перевага – наявність розвинутої мережі природоохоронних установ із власними науковими відділами, здатними виступати верифікаторами та науковими партнерами у реалізації програм громадянської науки. Серед ключових установ регіону, наприклад, Карпатський біосферний заповідник (Закарпатська область), НПП «Гуцульщина» (Івано-Франківська область), НПП «Синевир» (Закарпатська область), НПП «Сколівські Бескиди» (Львівська область) тощо, кожна з яких уже має науковий персонал, потенційно здатний взяти на себе роль модераторів і верифікаторів у проєктах громадянської науки.

Разом із тим, регіон має специфічні виклики. По-перше, нерівномірне покриття мобільним зв'язком: якщо вздовж популярних туристичних маршрутів 4G-з'єднання є стабільним, то у важкодоступних ділянках заповідних зон воно відсутнє. Оскільки iNaturalist підтримує офлайн-режим для фотофіксації з подальшою синхронізацією при відновленні з'єднання, цей виклик є частково нівельованим, проте потребує відповідного інструктажу учасників. По-друге, специфіка гірських екосистем формує складний таксономічний ландшафт: велика частка спостережень стосується рослин і хребетних, натомість безхребетні та гриби потребують значно вищого рівня експертизи для верифікації [21]. Це актуалізує необхідність залучення кваліфікованих регіональних ідентифікаторів із числа наукових співробітників природоохоронних установ. По-третє, значна частина потенційних учасників – мешканці сільських гірських громад старшого віку – відрізняється нижчим рівнем цифрової грамотності, що вимагає адаптованих форм залучення і навчання.

Важливим аргументом на користь системного запровадження громадянської науки в Карпатах є й доведена стійкість волонтерських мереж спостережень. Факт збереження 96% довоєнного рівня спостережень на iNaturalist у перший рік повномасштабного вторгнення та зростання активності у Карпатському регіоні свідчить про те, що волонтерська мотивація має глибоке ціннісне підґрунтя [10]. Ця закономірність узгоджується з висновками Weir et al., які показали, що участь громадян у моніторингових програмах на територіях, охоплених збройними конфліктами, не лише зберігається, а й може посилюватись як форма «мирної діяльності» та збереження зв'язку з рідною природою [26], що водночас вказує на те, що сьогодні Карпатський регіон є надзвичайно перспективним для розвитку громадянської науки в загальноукраїнському контексті.

Практичне значення описаних особливостей полягає в тому, що вони формують конкретні вимоги до дизайну освітніх протоколів природоохоронних установ регіону: пріоритет офлайн-сумісних сценаріїв спостережень, розподіл таксономічного навантаження між платформою (рослини, хребетні) і кваліфікованими ідентифікаторами установи (безхребетні, гриби), а також розробку окремих, спрощених форматів залучення для аудиторії старшого віку та мешканців гірських громад.

Теоретична модель інтеграції громадянської науки в систему екопросвітницької діяльності природоохоронних установ. На основі аналізу теоретичних засад, механізмів формування екологічної свідомості та міжнародного досвіду пропонується теоретична модель інтеграції громадянської науки в систему екопросвітницької діяльності природоохоронних установ Карпатського регіону. Модель побудована на перетині двох осей: рівня участі (від епізодичної до систематичної) та педагогічної цілі (від когнітивної до конативної). Ці два виміри формують матрицю, кожна клітина якої відповідає конкретній формі роботи.

Когнітивний вимір моделі орієнтований на формування знань – таксономічних, екологічних, методологічних. На рівні епізодичної участі це реалізується через інтерпретаційні стенди з QR-кодами на маршрутах, що пов'язують фізичний простір охоронюваної території з цифровою платформою; тематичні буклети «Що можна побачити в цьому лісі?» з переліком видів і посиланнями на відповідні записи в iNaturalist; коментовані відеоролики щодо ідентифікаційних ознак ключових видів регіону. На рівні систематичної участі когнітивний вимір підтримується через регулярні онлайн-вебінари з науковцями установи щодо конкретних таксономічних груп; доступ до кураторської колекції «Найкращі спостереження» на проєктах установи; публікацію щорічних «Підсумків сезону» з аналізом отриманих даних.

Афективний вимір моделі спрямований на формування емоційного зв'язку з природним середовищем. У контексті епізодичної участі це досягається через розповіді про конкретні «наукові відкриття», зроблені завдяки спостереженням волонтерів: нові для науки місцезнаходження рідкісних видів, несподівані знахідки, що змінили розуміння поширення певного таксону. Такі дії трансформують абстрактне «завантажте додаток» у реальну можливість зробити особисто значимий науковий внесок. Систематична участь додає афективний вимір через включення волонтерів у наукову публікацію у формі подяки або співавторства; відзначення найактивніших спосте-

рігачів на сайті установи; формування «спільноти знавців» з відчуттям взаємної приналежності та спільної місії.

Поведінковий вимір моделі є найскладнішим і найбільш довгостроковим. Він передбачає трансформацію позиції від пасивного «любителя природи» до активного «агента» природоохоронної поведінки. Інструментами цього переходу є залучення досвідченіших волонтерів до ролі «спільнотних наставників» (менторів для новачків); включення волонтерських мереж у реальні програми моніторингу інвазійних видів або рідкісних таксонів; створення механізмів зворотного зв'язку, коли волонтери отримують інформацію про те, яким чином їхні дані були використані в наукових публікаціях або управлінських рішеннях установи.

Таким чином, модель може бути представлена у вигляді трирівневої системи екопросвітницьких програм, заснованих на громадянській науці (табл. 1).

Запропонована модель базується на принципі «поступового залучення» (progressive engagement), що добре відомий у педагогіці неформальної освіти: жодна ефективна освітня програма не розпочинається з максимального рівня складності. Натомість вона забезпечує «сходинки» зростання компетентності та залученості, що дозволяє учасникам рухатися від рівня 1 до рівня 3 відповідно до власних можливостей, інтересів та часу.

Принциповою рисою моделі є синергія між науковим і освітнім виміром. Участь на кожному з рівнів одночасно генерує наукові дані (спостереження, що потрапляють до бази iNaturalist і можуть досягти статусу research grade та бути передані до GBIF [9]) і реалізує освітні цілі. Це принципово відрізняє модель від традиційних «освітніх програм», де наукова цінність є часто мінімальною, та від «чистого моніторингу», де освітній вимір ігнорується.

Обговорення. Запропонована концепція ставить кілька питань, що заслуговують на окреме обговорення. Перше з них стосується доведеності причинно-наслідкових зв'язків між участю в громадянській науці та формуванням екологічної свідомості. Попри широкий масив наявних досліджень, більшість із них є кореляційними або засновані на самозвітах учасників, що обмежує можливість встановлення прямої каузальності. Крім того, дані, зібрані волонтерами, характеризуються нерівномірним просторовим і таксономічним охопленням та систематичними зсувами вибірки, на що прямо вказують методи статистичного аналізу «зашумлених» мереж спостережень [12]. Відповідні рандомізовані контрольовані дослідження у цій галузі є рідкістю, зокрема через етичні труднощі із «контрольними групами» в освітніх програмах. Це є важливим застереженням при інтерпретації позитивних ефектів участі у проєктах громадянської науки.

Друге питання – ефект «відбору аудиторії». Є підстави вважати, що до проєктів громадянської науки переважно долучаються люди, які вже мають певний інтерес до природи та позитивне ставлення до охорони довкілля. Відповідно, вимірювані позитивні ефекти можуть відображати не «формування» екологічної свідомості, а лише «зміцнення» вже наявної. Це не знецінює практичну значущість платформ для природоохоронних установ, але актуалізує завдання розробки спеціальних програм залучення «нейтральної» аудиторії – насамперед, осіб без попереднього інтересу до природи.

Третє питання – стійкість ефектів у часі. Значна частина досліджень вимірює ефект участі одразу після або незабаром після завершення програми. Значно менше даних щодо довгострокового збереження сформованих знань, ставлень і поведінкових змін. Те, що відомо з досліджень натуралістичних

Таблиця 1

Трирівнева модель екопросвітницьких програм громадянської науки для природоохоронних установ Карпатського регіону

Рівень	Цільова аудиторія	Педагогічні цілі	Інструменти / форми роботи
Рівень 1. «Відкриття»	Туристи, відпочивальники, відвідувачі природоохоронних територій (разовий контакт)	Первинне знайомство з природою регіону; формування інтересу та позитивних емоцій; перший досвід наукового спостереження	QR-коди на стендах; тематичні буклети-визначники; інтерпретаційні екскурсії з iNaturalist; bioblitz-події під час свят та фестивалів
Рівень 2. «Залучення»	Школярі, студенти, місцеві мешканці, члени екологічних клубів (регулярний контакт)	Розвиток таксономічних знань; формування навичок спостереження; усвідомлення наукового значення власних дій	Сезонні навчальні програми; польові практикуми на базі ПЗФ; онлайн-вебінари з науковцями; тематичні проєкти iNaturalist за пріоритетними видами
Рівень 3. «Партнерство»	Досвідчені волонтери-натуралісти, науково-педагогічні працівники, журналісти (системна участь)	Формування природоохоронної ідентичності; розвиток наукової ефективності; активна участь у наукових та охоронних програмах	Співавторство у наукових публікаціях; участь у моніторингових програмах установи; роль наставника для новачків; участь у плануванні охоронних заходів

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

спільнот, свідчить: стійка ідентифікація себе як «натураліста» є потужним предиктором довгострокової природоохоронної поведінки – але для цього потрібна саме систематична участь (рівень 3 запропонованої моделі), а не разовий контакт [27, с. 1] [17].

Нарешті, важливим є питання інституційного потенціалу природоохоронних установ для реалізації освітніх функцій. В умовах воєнного часу більшість природоохоронних установ України стикаються зі скороченням персоналу, бюджетними обмеженнями та загальною нестабільністю. Для впровадження повноцінних освітніх програм потрібна системна підтримка на рівні Міністерства економіки, довкілля та сільського господарства України, а також науково-методична допомога від університетів і дослідницьких установ. Описана модель свідомо проєктувалась як масштабована «від мінімально необхідного» – базовий рівень (QR-коди, буклет, проєкт в iNaturalist) можна запровадити силами одного-двох співробітників без додаткового фінансування.

Висновки

1. Громадянська наука є не лише інструментом збору біологічних даних, а й повноцінним педагогічним феноменом із доведеним потенціалом формування екологічної свідомості. Участь у проєктах натуралістичних спостережень позитивно впливає на всі три компоненти екологічної свідомості: когнітивний (розвиток знань), афективний (посилення емоційного зв'язку з природою) та поведінковий (стимулювання природоохоронної поведінки).

2. Дуальна функція цифрових платформ громадянської науки – наукова і освітня – є їхньою принциповою характеристикою, що відрізняє їх від традиційних форм як моніторингу, так і екологічної освіти. Саме ця синергія обумовлює особливу перспективність платформ для природоохоронних установ.

3. Карпатський регіон України має сукупність об'єктивних переваг для впровадження програм громадянської науки: унікальне біорізноманіття, розвинену мережу охоронюваних територій, значний туристичний потік та документально підтверджену стійкість волонтерських мереж спостережень навіть в умовах військового конфлікту.

4. Запропонована трирівнева модель екопросвітницьких програм на основі громадянської науки враховує різні категорії аудиторії та рівні залученості і може бути реалізована природоохоронними установами без значних додаткових ресурсів – починаючи з базового рівня «Відкриття» та поступово переходячи до рівня «Партнерства».

Перспективи використання результатів дослідження. Перспективним напрямком подальших досліджень є: розробка та апробація конкретних освітніх протоколів для природоохоронних установ Карпатського регіону із відповідними інструментами педагогічного вимірювання ефективності; довготривалі дослідження стійкості ефектів участі у проєктах громадянської науки; порівняльний аналіз ефективності різних рівнів моделі для різних соціально-демографічних груп учасників. Практичним результатом застосування запропонованої моделі є готовий алгоритм дій для природоохоронних установ регіону – від мінімально ресурсномісткого рівня «Відкриття» до повноцінного наукового партнерства, що може бути безпосередньо використаний адміністраціями національних природних парків і біосферних заповідників Карпат при плануванні екопросвітницької роботи.

Література

1. Ballard H.L., Dixon C.G.H., Harris E.M. Youth-focused citizen science: Examining the role of environmental science learning and agency for conservation. Biological Conservation. 2017. Vol. 208. P. 65–75. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.05.024
2. Bonnet P., Joly A., Deneu B., Servajean M., Kahl S., Glotin H., Planqué R. How citizen scientists contribute to monitor protected areas thanks to automatic plant identification tools. Ecological Solutions and Evidence. 2020. Vol. 1 DOI: https://doi.org/10.1002/2688-8319.12023
3. Bonney R., Cooper C.B., Dickinson J., Kelling S., Phillips T., Rosenberg K.V., Shirk J. Citizen science: A developing tool for expanding science knowledge and scientific literacy. BioScience. 2009. Vol. 59, № 11. P. 977–984. DOI: https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.11.9
4. Bonney R., Phillips T.B., Ballard H.L., Enck J.W. Can citizen science enhance public understanding of science? Public Understanding of Science. 2016. Vol. 25, № 1. P. 2–16. DOI: https://doi.org/10.1177/0963662515607406
5. Brossard D., Lewenstein B., Bonney R. Scientific knowledge and attitude change: The impact of a citizen science project. International Journal of Science Education. 2005. Vol. 27, № 9. P. 1099–1121. DOI: https://doi.org/10.1080/09500690500069483
6. Carpathian Convention. Framework Convention on the Protection and Sustainable Development of the Carpathians. UNEP, 2003. URL: http://www.carpathianconvention.org/convention/history/
7. Chandler M., See L., Copas K., Bonde A.M.Z., López B.C., Danielsen F., Serret H. Contribution of citizen science towards international biodiversity monitoring. Biological Conservation. 2017. Vol. 213. P. 280–294. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.09.004
8. Evans C., Abrams E., Reitsma R., Roux K., Salmonsen L., Marra P.P. The Neighborhood Nestwatch Program: Participant outcomes of a citizen-science ecological research project. Conservation Biology. 2005. Vol. 19, № 3. P. 589–594. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2005.00s01.x
9. GBIF. Commitment to sharing biodiversity data from Ukraine persists despite war. Global Biodiversity Information Facility, 2022. URL: https://www.gbif.org/news/6ANjx5aw95batJPtKmonKk/commitment-to-sharing-biodiversity-data-from-ukraine-persists-despite-war

10. IFAW. War in Ukraine has devastating consequences for biodiversity. International Fund for Animal Welfare, 24.02.2023. URL: https://www.ifaw.org/international/press-releases/war-ukraine-biodiversity
11. iNaturalist. 1,000,000 iNat observations from Ukraine: summary and some stats. iNaturalist Blog, 2023. URL: https://www.inaturalist.org/journal/igor117/84530-1-000-000-inat-observations-from-ukraine-summary-and-some-stats
12. Isaac N.J.B., van Strien A.J., August T.A., de Zeeuw M.P., Roy D.B. Statistics for citizen science: extracting signals from noisy networks. Methods in Ecology and Evolution. 2014. Vol. 5, № 10. P. 1052–1060. DOI: https://doi.org/10.1111/2041-210X.12254
13. Jordan R., Gray S., Demeter M., Lui L., Hmelo-Silver C. Understanding factors that influence learning to identify, classify and communicate in an ecology citizen science project. International Journal of Science Education. 2011. Vol. 33, № 7. P. 1–21.
14. Kaplan R., Kaplan S. The Experience of Nature: A Psychological Perspective. Cambridge : Cambridge University Press, 1989. 340 p.
15. Latour B., Woolgar S. Laboratory Life: The Construction of Scientific Facts. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1986. 279 p.
16. Lave J., Wenger E. Situated Learning: Legitimate Peripheral Participation. Cambridge : Cambridge University Press, 1991. 138 p. DOI: https://doi.org/10.1017/CBO9780511815355
17. Meng Y., Chen J. Naturalist identity and biodiversity conservation: the mediating role of obligation. PsyCh Journal. 2026. Vol. 15, № 3. e70098. DOI: https://doi.org/10.1002/pchj.70098
18. Mason B.M., Mesaglio T., Heitmann J.B., Chandler M., Chowdhury S., Gorta S.B.Z., Callaghan C.T. iNaturalist accelerates biodiversity research. BioScience. 2025. Vol. 75, № 11. P. 953–965. DOI: https://doi.org/10.1093/biosci/biaf028
19. Mezirow J. Perspective transformation. Adult Education. 1978. Vol. 28, № 2. P. 100–110. DOI: https://doi.org/10.1177/074171367802800202
20. Phillips T., Porticella N., Constas M., Bonney R. A framework for articulating and measuring individual learning outcomes from participation in citizen science. Citizen Science: Theory and Practice. 2018. Vol. 3, № 2. P. 3. DOI: https://doi.org/10.5334/cstp.126
21. Prylutskyi O., Kapets N. State-of-the-art of iNaturalist as a source of data on Ukrainian fungi. Citizen Science: Theory and Practice. 2024. Vol. 9, № 1. P. 25. DOI: https://doi.org/10.5334/cstp.717
22. Shirk J.L., Ballard H.L., Wilderman C.C., Phillips T., Wiggins A., Jordan R. et al. Public participation in scientific research: A framework for deliberate design. Ecology and Society. 2012. Vol. 17, № 2. P. 29. DOI: https://doi.org/10.5751/ES-04705-170229
23. Tajfel H., Turner J.C. An integrative theory of intergroup conflict. The Social Psychology of Intergroup Relations / ed. by W.G. Austin, S. Worchel. Monterey : Brooks/Cole, 1979. P. 33–47.
24. Toomey A.H., Domroese M.C. Can citizen science lead to positive conservation attitudes and behaviors? Human Ecology Review. 2013. Vol. 20, № 1. P. 50–62.
25. Trumbull D.J., Bonney R., Bascom D., Cabral A. Thinking scientifically during participation in a citizen-science project. Science Education. 2000. Vol. 84, № 2. P. 265–275. DOI:https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-237X(200003)84:2%3C265::AID-SCE7%3E3.0.CO;2-5
26. Weir D., McQuillan D., Francis R.A. Civilian science: the potential of participatory environmental monitoring in areas affected by armed conflicts. Environmental Monitoring and Assessment. 2019. Vol. 191. DOI: https://doi.org/10.1007/s10661-019-7773-9
27. Wilson E.O. Biophilia. Cambridge, MA : Harvard University Press, 1984. 157 p.

Дата першого надходження статті до видання: 20.07.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

УДК 504.064:628.4
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.52

ОЦІНКА ЧИННИКІВ ФОРМУВАННЯ НЕСАНКЦІОНОВАНИХ СМІТТЄЗВАЛИЩ У МИКОЛАЇВСЬКІЙ ОБЛАСТІ ТА НАПРЯМИ ЗАПОБІГАННЯ ЇХ УТВОРЕННЮ

Літвак О.А. (orcid.org/0000-0002-1351-3900),
Літвак С.М. (orcid.org/0000-0002-1508-8493)
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
пр. Героїв України, 9, 54007, Миколаїв
olya.litvak@gmail.com, sergiy.litvak@nuos.edu.ua

У статті розглянуто проблему несанкціонованих сміттєзвалищ у Миколаївській області як один із чинників зниження рівня екологічної безпеки територіальних громад. Обґрунтовано, що стихійне накопичення відходів не може розглядатися лише як наслідок порушення правил благоустрою, оскільки його виникнення зумовлене поєднанням інфраструктурних, просторових, управлінських, соціально-економічних і поведінкових передумов. Метою дослідження є оцінювання чинників формування несанкціонованих сміттєзвалищ у регіональному контексті та обґрунтування напрямів запобігання їх утворенню і повторному виникненню. Систематизовано основні групи чинників, що сприяють нелегальному складуванню відходів: недостатнє охоплення населення послугами збирання й вивезення, обмежена доступність пунктів приймання окремих фракцій, послаблений контроль за потенційними місцями нелегального скидання відходів**,** поширення неформального вивезення та низька екологічна обізнаність населення. Визначено, що регіональні особливості Миколаївської області, зокрема поєднання урбанізованих і сільських територій, аграрних ландшафтів, транспортних коридорів, балок, ярів, річкових долин і прибережно-лиманних зон, зумовлюють просторову диференціацію ризиків у межах окремих районів. Проаналізовано практику ліквідації несанкціонованих сміттєзвалищ в районах області за 2024-2025 роки. Встановлено суттєву територіальну нерівномірність кількості та площі ліквідованих осередків засмічення. Окрему увагу приділено обмеженням регіональної системи управління відходами, пов'язаним із недостатнім розвитком потужностей сортування й перероблення, нерівномірним охопленням громад централізованим вивезенням, а також проблемою будівельних відходів і відходів від руйнувань. Обґрунтовано необхідність переходу від переважно ліквідаційної моделі реагування до профілактичного управління проблемними територіями. Запропоновано комплекс заходів, що передбачає розвиток доступної інфраструктури поводження з відходами, створення легальних каналів приймання та оброблення окремих фракцій, картування ризикових ділянок нелегального скидання відходів, контроль за очищеними територіями та системну інформаційно-просвітницьку роботу з населенням. Реалізація таких заходів сприятиме зменшенню кількості стихійних звалищ, запобіганню повторному засміченню територій і підвищенню екологічної безпеки громад. *Ключові слова:* несанкціоновані сміттєзвалища, управління відходами, Миколаївська область, екологічна безпека, територіальні громади, запобігання повторному засміченню.

Assessment of the factors contributing to the formation of unauthorized dumpsites in Mykolaiv region and measures for their prevention. Litvak O., Litvak S.

The article examines the problem of unauthorized dumpsites in Mykolaiv region as one of the factors contributing to a decrease in the level of environmental safety of territorial communities. It is substantiated that spontaneous waste accumulation cannot be considered solely as a consequence of violations of municipal maintenance rules, since its occurrence is caused by a combination of infrastructural, spatial, managerial, socio-economic and behavioral preconditions. The aim of the study is to assess the factors contributing to the formation of unauthorized dumpsites in a regional context and to substantiate directions for preventing their formation and recurrence. The main groups of factors contributing to illegal waste disposal have been systematized: insufficient coverage of the population by waste collection and removal services, limited availability of collection points for specific waste fractions, weakened control over potential illegal dumping sites, the spread of informal waste removal practices, and low environmental awareness among the population. It is determined that the regional features of Mykolaiv region, in particular the combination of urbanized and rural areas, agricultural landscapes, transport corridors, gullies, ravines, river valleys, and coastal-estuarine zones, determine the spatial differentiation of risks within individual districts. The practice of eliminating unauthorized dumpsites in the districts of the region during 2024–2025 is analyzed. A significant territorial unevenness in the number and area of eliminated waste accumulation sites is established. Particular attention is paid to the limitations of the regional waste management system, related to the insufficient development of sorting and recycling capacities, uneven coverage of communities by centralized waste removal services, as well as the problem of construction waste and debris waste. The need to shift from a predominantly elimination-based response model to preventive management of problem areas is substantiated. A set of measures has been proposed, including the development of accessible waste management infrastructure, the creation of legal channels for the collection and

© Літвак О.А., Літвак С.М., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

treatment of specific waste fractions, the mapping of risk areas for illegal waste dumping, control over cleaned-up areas, and systematic information and awareness-raising work with the population. The implementation of such measures will contribute to reducing the number of spontaneous dumpsites, preventing repeated pollution of territories, and improving the environmental safety of communities. *Key words:* unauthorized dumpsites, waste management, Mykolaiv region, environmental safety, territorial communities, prevention of repeated pollution.

Постановка проблеми. Проблема утворення та поширення несанкціонованих сміттєзвалищ залишається однією з актуальних екологічних і соціально-господарських проблем для багатьох регіонів України. Незважаючи на реформування сфери управління відходами, у значній частині територіальних громад зберігаються труднощі з організацією регулярного збирання, перевезення, сортування та безпечного видалення окремих видів відходів. Унаслідок цього побутові, будівельні, великогабаритні, рослинні та інші відходи нерідко накопичуються поза межами офіційно визначених місць їх збирання чи видалення.

Несанкціоновані сміттєзвалища є джерелом комплексного антропогенного навантаження на довкілля. Вони спричиняють погіршення санітарного стану територій, забруднення ґрунтів, поверхневих і підземних вод, поширення неприємних запахів, ризики займання відходів, а також зниження рекреаційної та естетичної цінності ландшафтів [1]. Особливу небезпеку становить потрапляння до таких звалищ компонентів, що потребують спеціального збирання й оброблення, зокрема електронних відходів, шин, батарейок, залишків лакофарбових матеріалів та інших небезпечних побутових відходів.

Для Миколаївської області, як і для багатьох інших регіонів України, ця проблема набуває конкретного регіонального прояву, що пов'язано з поєднанням урбанізованих територій, сільських населених пунктів, аграрних ландшафтів, транспортних коридорів, прибережно-лиманних і водоохоронних зон. У таких умовах несанкціоновані сміттєзвалища можуть формуватися як у межах населених пунктів, так і на малоконтрольованих територіях – уздовж доріг, у лісосмугах, балках, ярах, на околицях поселень і поблизу водних об'єктів.

Отже, науково-практична проблема полягає у необхідності визначення причин формування несанкціонованих сміттєзвалищ у регіональному контексті та оцінювання передумов, які сприяють їх повторному виникненню після ліквідації. Такий підхід дає змогу розглядати стихійні звалища не лише як окремі осередки засмічення, а як наслідок недосконалості місцевої системи управління відходами.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю переходу від переважно ліквідаційного підходу до профілактичної моделі управління проблемою несанкціонованих сміттєзвалищ. Практика періодичного прибирання засмічених територій не забезпечує довгострокового результату, якщо не усунуто першопричини повторного накопичення відходів. Для Миколаївської області важливість цієї теми додатково посилюється сучасними викликами, пов'язаними з воєнним навантаженням на регіон, пошкодженням інфраструктури, утворенням відходів від руйнувань, зміною логістичних маршрутів і обмеженими фінансовими можливостями територіальних громад. У таких умовах зростає потреба у більш раціональній організації місцевих систем управління відходами та формуванні для населення і суб'єктів господарювання доступних легальних альтернатив неорганізованому накопиченню відходів.

Тому дослідження чинників формування несанкціонованих сміттєзвалищ у Миколаївській області є необхідним для обґрунтування більш ефективних управлінських рішень на місцевому та регіональному рівнях. У цьому контексті особливого значення набуває формування профілактичної моделі управління проблемними територіями, орієнтованої на розвиток інфраструктури збирання відходів, моніторинг ризикових ділянок несанкціонованого накопичення відходів і підвищення екологічної безпеки громад.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження проблеми формування та запобігання несанкціонованим сміттєзвалищам безпосередньо пов'язане з реалізацією державної політики України у сфері управління відходами, охорони довкілля, сталого розвитку територіальних громад та європейської інтеграції. В умовах реформування природоохоронного законодавства особливого значення набуває перехід від практики ліквідації наслідків засмічення до системного запобігання утворенню стихійних звалищ, розвитку роздільного збирання, повторного використання, рециклінгу та безпечного видалення залишкових фракцій. Такі напрями відповідають положенням Закону України «Про управління відходами», який визначає правові, організаційні та економічні засади діяльності у цій сфері [2].

Авторський доробок узгоджується із завданнями Національного плану управління відходами до 2033 року, який передбачає реалізацію заходів у сфері управління відходами на національному, регіональному та місцевому рівнях [3]. У цьому контексті дослідження несанкціонованих сміттєзвалищ в Миколаївській області порушує питання підвищення ефективності регіональної системи управління відходами та потребує узгоджених дій органів місцевого самоврядування, операторів з управління відходами, контролюючих органів, населення і суб'єктів господарювання.

Євроінтеграційний вимір дослідження пов'язаний із наближенням національного законодавства

до положень Директиви 2008/98/ЄС про відходи та Директиви 1999/31/ЄС про захоронення відходів, які акцентують увагу на ієрархії управління відходами, плануванні, запобіганні їх утворенню, скороченні обсягів захоронення та безпечному видаленні залишкових фракцій [4, 5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика утворення несанкціонованих сміттєзвалищ розглядається у сучасних дослідженнях в контексті управління муніципальними відходами, екологічної безпеки територій, просторового планування, циркулярної економіки та сталого розвитку громад. У звіті «Global Waste Management Outlook 2024», підготовленому Програмою ООН з навколишнього середовища (UNEP) спільно з Міжнародною асоціацією твердих відходів (ISWA), наголошено, що збереження неефективних практик поводження з відходами посилює екологічні, санітарні, кліматичні та економічні ризики [6].

У зарубіжних наукових працях несанкціоноване складування відходів розглядається як багатофакторне явище, що формується під впливом комплексу взаємопов'язаних передумов. Зокрема, L. Du, H. Xu та J. Zuo систематизують напрями досліджень незаконного скидання відходів, пов'язані з оцінюванням екологічних наслідків, поведінковими аспектами, чинниками ризику та технологіями моніторингу [7]. Також S. Syafrudin та співавтори доводять значення локальних умов, доступності системи збирання відходів, розміщення пунктів приймання, щільності населення та особливостей забудови [8]. Окрему увагу в зарубіжних дослідженнях приділено використанню GIS-технологій, дистанційного зондування та цифрових інструментів для виявлення, картування й моніторингу звалищ. Цей напрям узагальнено у праці P. Fraternali, L. Morandini та S. L. Herrera González [9]. Питання оптимізації розміщення контейнерів у системі муніципальної логістики відходів розглянуто D. G. Rossit та S. Nesmachnow [10].

У контексті циркулярної економіки акцент робиться на скороченні захоронення відходів, розвитку повторного використання, рециклінгу, компостування та матеріального відновлення [11]. Європейський план дій з циркулярної економіки орієнтує політику управління відходами на запобігання їх утворенню та утримання ресурсів в економіці якомога довше [12]. Такий підхід є важливим для розуміння несанкціонованих сміттєзвалищ як наслідку недостатньої доступності легальних і ресурсоефективних каналів поводження з різними потоками відходів.

У вітчизняних дослідженнях значна увага приділяється регіональним, соціально-економічним, організаційним та екологічним аспектам поводження з твердими побутовими відходами. Ці питання розглянуто у працях Н. В. Стратічук, О. В. Березюка, М. С. Лемешева, Л. О. Герасимчук, Р. А. Валерко, Н. Ф. Долінської, О. В. Вітер [13, 14, 15]. Екологічні наслідки функціонування полігонів, сміттєзвалищ і місць несанкціонованого накопичення відходів, зокрема їх вплив на ґрунти, водні об'єкти та інші компоненти довкілля, висвітлено у працях Т. І. Дмитрухи, Л. М. Черняк, В. Ф. Фролова, В. П. Петрусенка, О. В. Лапань, Л. Ю. Симочко, О. В. Гафіяк, О. С. Дем'янюк, С. В. Домусчи та В. І. Тригуб [16, 17, 18].

Наведені праці формують наукове підґрунтя для подальшого аналізу чинників виникнення несанкціонованих сміттєзвалищ та обґрунтування заходів щодо їх запобігання на регіональному рівні.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Попри наявність значної кількості наукових праць, присвячених управлінню побутовими відходами, функціонуванню полігонів, екологічним наслідкам сміттєзвалищ і розвитку роздільного збирання, недостатньо опрацьованими залишаються питання комплексного аналізу причин формування саме несанкціонованих сміттєзвалищ у регіональному вимірі. Зокрема, потребує систематизації сукупність причин і умов, які сприяють нелегальному складуванню відходів та повторному засміченню територій після проведення ліквідаційних заходів.

У цьому контексті недостатньо розкритими залишаються регіональні особливості поширення стихійних сміттєзвалищ, а також обґрунтування профілактичних заходів, спрямованих не лише на ліквідацію вже наявних осередків засмічення, а передусім на запобігання їх повторному виникненню в умовах реформування сфери управління відходами та сучасних екологічних викликів.

Новизна дослідження полягає в систематизації чинників формування несанкціонованих сміттєзвалищ у Миколаївській області та визначенні регіональних особливостей їх прояву в межах окремих районів. Запропоновано профілактичний підхід до управління проблемними територіями, орієнтований на усунення передумов повторного засмічення та підвищення екологічної безпеки територіальних громад.

Методологічне та загальнонаукове значення. Методологічне значення дослідження полягає у застосуванні комплексного підходу до оцінювання передумов формування несанкціонованих сміттєзвалищ на регіональному рівні. Такий підхід передбачає поєднання аналізу наукових джерел, нормативно-правових документів, статистичних та інформаційних матеріалів щодо стану управління відходами, а також узагальнення практичних заходів, спрямованих на запобігання повторному засміченню територій. Загальнонаукове значення роботи полягає в уточненні уявлень про стихійні сміттєзвалища не лише як локальні осередки забруднення, а як прояв недосконалості системи управління відходами, просторової організації території та взаємодії населення з наявною інфраструктурою.

Виклад основного матеріалу. Формування несанкціонованих сміттєзвалищ є результатом дії комплексу причин і умов, що проявляються на рівні окремих громад, населених пунктів та малоконтрольованих територій. Для узагальнення цих передумов чинники виникнення стихійних осередків накопичення відходів систематизовано за основними групами, що дає змогу визначити не лише причини їх появи, а й можливі напрями профілактичного впливу (табл. 1).

Наведені чинники не діють ізольовано, а взаємно посилюють один одного. Найчастіше формування стихійних звалищ пов'язане з недостатньою доступністю організованого збирання та вивезення відходів, відсутністю зручних каналів для будівельних, великогабаритних, рослинних і небезпечних побутових відходів, а також слабким контролем за малоконтрольованими ділянками. За таких умов населення або суб'єкти господарювання можуть обирати неформальні способи видалення відходів, особливо якщо легальна альтернатива є незручною, віддаленою або фінансово обтяжливою.

Важливе значення мають також просторові та поведінкові передумови. Найвищий ризик утворення стихійних звалищ характерний для ділянок зі зручним під'їздом, низьким рівнем контролю та обмеженою видимістю. Повторне засмічення таких місць особливо ймовірне за відсутності подальшого нагляду, обмеження доступу до очищеної ділянки та доступних легальних каналів приймання відповідних фракцій відходів [19]. Отже, профілактика несанкціонованих сміттєзвалищ має поєднувати інфраструктурні, контрольні та інформаційні заходи.

В межах Миколаївської області загальні для багатьох регіонів України передумови формування несанкціонованих сміттєзвалищ набувають конкретного просторового прояву. Водночас конкретне співвідношення природно-географічних та соціально-господарських умов впливає на ризики несанкціонованого накопичення відходів. Екологічні ризики посилюються наявністю водних об'єктів басейну Чорного моря, зокрема Південного Бугу, Інгулу, малих річок, ставків і лиманних територій. Розміщення відходів у пониженнях рельєфу чи поблизу водних об'єктів створює умови для забруднення ґрунтів, поверхневих і підземних вод [20]. Під час зливових опадів забруднюючі речовини можуть переноситися поверхневим стоком, тоді як у посушливий період зростають ризики запилення, поширення запахів, займання або спалювання відходів.

Додаткової уваги потребують природоохоронні та рекреаційні території, зокрема національний при-

Таблиця 1

Систематизація чинників формування несанкціонованих сміттєзвалищ

Група чинників	Основні прояви	Екологічні наслідки та ризики
Інфраструктурні	Недостатня кількість контейнерних майданчиків, нерегулярне вивезення відходів, відсутність доступних пунктів приймання великогабаритних, будівельних, рослинних і небезпечних побутових відходів	Накопичення змішаних відходів, погіршення санітарного стану територій, забруднення ґрунтів, поширення неприємних запахів
Економічні	Бажання уникнути витрат на офіційне вивезення відходів, висока або незрозуміла вартість послуг, поширення неформальних перевізників	Збільшення обсягів нелегально скинутих будівельних, ремонтних і великогабаритних відходів, засмічення відкритих територій
Управлінсько-контрольні	Недостатній контроль за засміченням територій, повільне реагування на виявлені звалища, низька невідворотність відповідальності	Повторне накопичення відходів після прибирання, розширення площі забруднених ділянок, тривале антропогенне навантаження на довкілля
Соціально-поведінкові	Низький рівень екологічної культури, відсутність звички сортування, необізнаність щодо легальних способів здавання окремих фракцій відходів	Засмічення територій навіть за наявності базової контейнерної інфраструктури, потрапляння ресурсоцінних і небезпечних компонентів до змішаних відходів
Просторові	Наявність малоконтрольованих ділянок зі зручним під'їздом: лісосмуг, ярів, балок, пустирів, прибережних зон, територій біля доріг	Деградація рослинного покриву, забруднення ґрунтів, підвищення ризику змиву забруднювачів у поверхневі води
Проблемні фракції відходів	Накопичення шин, батарейок, електронних відходів, меблів, будівельних матеріалів, залишків фарб, мастил та інших небезпечних компонентів	Підвищення токсикологічних ризиків, забруднення ґрунтів і водних об'єктів, ускладнення безпечного вилучення та подальшого оброблення відходів
Сезонні та кризові	Зростання обсягів відходів у дачний, туристичний або ремонтний період, логістичні збої, наслідки руйнування інфраструктури	Перевантаження системи збирання відходів, збільшення ризику появи нових стихійних осередків засмічення, накопичення змішаних і будівельних відходів

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

Таблиця 2

Регіональні особливості районів Миколаївської області в контексті ризиків утворення несанкціонованих сміттєзвалищ

Район Миколаївської області	Природно-господарські особливості	Типові ризики утворення несанкціонованих сміттєзвалищ
Миколаївський	Найвищий рівень урбанізації, наявність обласного центру та приміських територій, інтенсивні транспортні потоки, прибережно-лиманні зони, річки Південний Буг та Інгул	Накопичення будівельних, ремонтних, великогабаритних і змішаних побутових відходів у межах міських, приміських і транспортно пов'язаних територій; ризики забруднення прибережних смуг і водних об'єктів
Вознесенський	Переважання сільських територій, аграрна спеціалізація, наявність долин малих річок, балок і ярів	Утворення стихійних звалищ на малоконтрольованих ділянках сільської місцевості; складність охоплення віддалених населених пунктів регулярним вивезенням; ризик перенесення забруднювачів у водотоки
Первомайський	Північна частина області, значна кількість невеликих населених пунктів, аграрне використання територій, поширення приватного сектору	Накопичення змішаних побутових, рослинних і будівельних відходів у межах периферійних частин населених пунктів та прилеглих господарських територій; обмежена доступність спеціалізованого збирання окремих фракцій
Баштанський	Значні площі сільськогосподарських угідь, розосереджена система поселень, транспортні зв'язки між громадами	Незаконне скидання відходів на віддалених або недостатньо контрольованих ділянках; висока ймовірність повторного засмічення після прибирання за відсутності профілактичних заходів

родний парк «Бузький Гард», природний заповідник «Єланецький степ» та інші об'єкти природно-заповідного фонду області. Наявність таких територій підвищує вимоги до екологічно безпечного поводження з відходами, оскільки стихійні звалища можуть спричиняти деградацію ландшафтів, забруднення ґрунтів, засмічення рекреаційних зон і негативний вплив на біорізноманіття.

Після адміністративно-територіальної реформи Миколаївська область поділяється на чотири укрупнені райони: Миколаївський, Вознесенський, Первомайський і Баштанський. Кожен із них має власне поєднання природних умов, типів розселення, господарської спеціалізації та інфраструктурних обмежень. Це дає підстави розглядати проблему несанкціонованих сміттєзвалищ не лише загалом по області, а й у розрізі районів, оскільки причини та типові місця утворення стихійних звалищ можуть істотно відрізнятися.

Узагальнення регіональних особливостей свідчить, що ризики утворення несанкціонованих сміттєзвалищ в районах Миколаївської області мають просторово неоднорідний характер. У більш урбанізованому Миколаївському районі вони переважно пов'язані з накопиченням будівельних, ремонтних, великогабаритних і змішаних побутових відходів у приміських та малоконтрольованих зонах. В районах із переважанням сільських і аграрних територій ризики зумовлюються розосередженістю населених пунктів, обмеженою доступністю послуг збирання й вивезення відходів, наявністю ділянок, де складніше забезпечити постійний контроль. Це підтверджує необхідність диференційованого підходу до запобігання стихійним звалищам з урахуванням природних, господарських та інфраструктурних умов окремих районів області.

Практика протидії несанкціонованим сміттєзвалищам у Миколаївській області ґрунтується на поєднанні заходів місцевого рівня та державного екологічного контролю, що простежується, зокрема, у 2024-2025 рр. Основний обсяг робіт, пов'язаний із виявленням, обстеженням, прибиранням і профілактикою повторного засмічення територій, виконують органи місцевого самоврядування та комунальні служби. Водночас Державна екологічна інспекція Південно-Західного округу здійснює контрольні функції, реагує на звернення громадян та узагальнює інформацію щодо виявлених осередків засмічення. В умовах воєнного стану роль територіальних громад у практичному вирішенні цієї проблеми помітно зростає.

Одним із чинників, що ускладнює системну протидію стихійним сміттєзвалищам, залишається недостатній розвиток інфраструктури управління відходами. У регіоні бракує потужностей для сортування, перероблення та оброблення окремих фракцій, а централізоване вивезення побутових відходів охоплює не всі територіальні громади. Це обмежує доступ населення до легальних способів поводження з будівельними, великогабаритними, рослинними, електронними та небезпечними побутовими відходами.

Важливим напрямом профілактики утворення несанкціонованих сміттєзвалищ є розвиток роздільного збирання відходів. Станом на 01.01.2025 р. еле-

ментами роздільного збирання були охоплені окремі міста Миколаївської області, проте рівень такого охоплення є нерівномірним (рис. 1). Найвищий показник зафіксовано в м. Очакові – 100,0 %, тоді як найнижчий у м. Первомайську – 10,2 % [21]. Водночас ці показники не слід ототожнювати з повноцінною багатофракційною системою роздільного збирання, оскільки в більшості випадків окремо збираються лише окремі види відходів, передусім пластик. Це свідчить про те, що розвиток інфраструктури роздільного збирання в області поки що є недостатнім для істотного зменшення навантаження на полігони та запобігання утворенню стихійних сміттєзвалищ.

Для характеристики практичних результатів ліквідації несанкціонованих сміттєзвалищ використано показники кількості та площі ліквідованих осередків засмічення у розрізі районів Миколаївської області за 2024 р. та станом на 05.10.2025 р. Інформаційною основою стали дані, наведені з посиланням на матеріали Державної екологічної інспекції Південно-Західного округу [22], а також окремі інформаційні повідомлення інспекції щодо виявлення та ліквідації стихійних сміттєзвалищ на території області [23]. Територіальні відмінності за цими показниками наведено на рис. 2 і рис. 3.

Аналіз наведених даних свідчить про суттєву нерівномірність ліквідації несанкціонованих сміттєзвалищ у межах області. У 2024 р. найбільшу кількість ліквідованих звалищ зафіксовано у Вознесенському та Первомайському районах, водночас найбільша площа ліквідованих осередків припадала на Вознесенський район. Станом на 05.10.2025 р. суттєво зросла кількість ліквідованих сміттєзвалищ у Миколаївському районі, що може свідчити про концентрацію значної кількості дрібних осередків засмічення та активізацію робіт з їх виявлення й прибирання. Водночас за площею ліквідованих звалищ провідне місце зберігає Вознесенський район, що вказує на наявність більших за розміром осередків засмічення.

Інформаційні матеріали Державної екологічної інспекції Південно-Західного округу свідчать, що виявлення та ліквідація несанкціонованих сміттєзвалищ у Миколаївській області часто здійснюються за зверненнями громадян, у тому числі через сервіс «ЕкоЗагроза». Зафіксовані випадки стосуються як міських територій Миколаєва, так і сільських громад Вознесенського та Первомайського районів. У складі таких звалищ переважають побутові, ремонтні, рослинні відходи, пластик, папір і суха рослинність. Окрему небезпеку становлять осередки засмічення, розташовані поблизу водних об'єктів і в прибережних захисних смугах [24, 25].

Водночас ефективність протидії несанкціонованим сміттєзвалищам у Миколаївській області обмежується низкою системних проблем у сфері управління відходами. Одним із ключових бар'єрів є відсутність актуального регіонального плану управління відходами. Після 2020 року такий документ фактично не був завершений, зокрема через недостатнє фінансування його розроблення. За таких умов територіальні громади змушені вирішувати проблему переважно фрагментарно, спираючись на локальні програми, наявні фінансові ресурси та поточні можливості комунальних служб. Це ускладнює формування узгодженої регіональної системи запобігання утворенню стихійних звалищ, розвитку роздільного збирання, сортування та перероблення відходів.

Стан інфраструктури видалення відходів також свідчить про наявність значних обмежень. На початок 2025 р. у Миколаївській області налічувалося 267 сміттєзвалищ і полігонів загальною площею 524,4 га, однак лише 44 з них мали паспорти місць видалення відходів. Середня наповненість сміттєзвалищ області становила 53 %, а в містах обласного значення – понад 85 %. До перевантажених належать полігони Вознесенська, Первомайська та Південноукраїнська загальною площею 19,8 га [26].

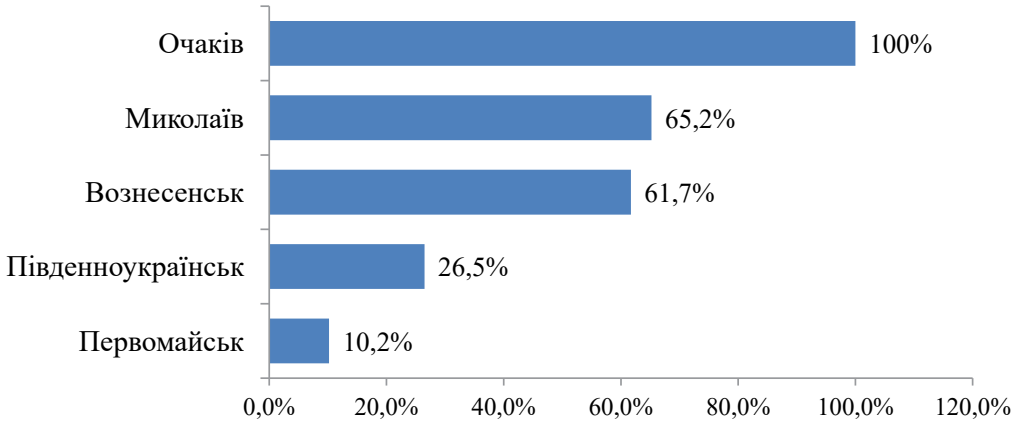


Рис. 1. Охоплення населення міст Миколаївської області елементами роздільного збирання відходів

ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

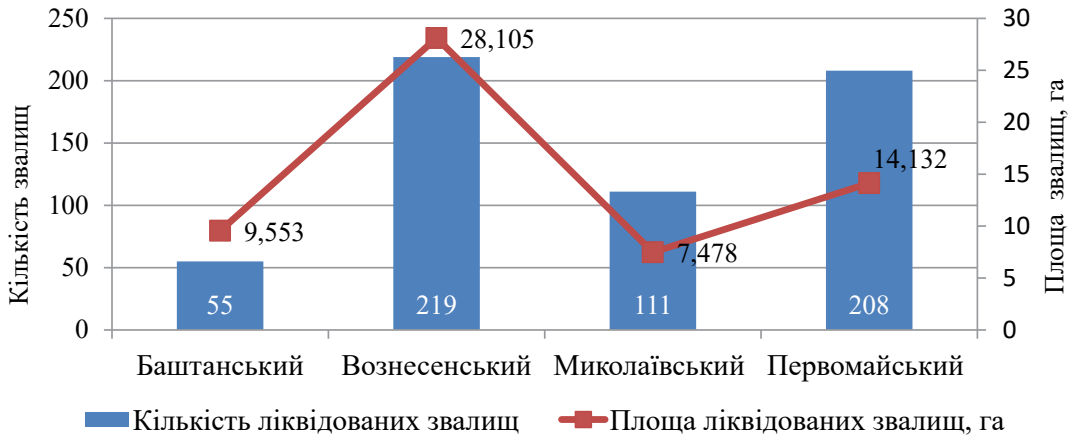


Рис. 2. Кількість і площа ліквідованих несанкціонованих сміттєзвалищ в районах Миколаївської області за 2024 р.



Рис. 3. Кількість і площа ліквідованих несанкціонованих сміттєзвалищ в районах Миколаївської області станом на 5 жовтня 2025 року

Додатковою проблемою є відсутність у регіоні діючих сміттєпереробних і сміттєспалювальних підприємств, а також нерівномірне охоплення територіальних громад централізованим вивезенням побутових відходів. Водночас наявність окремих пунктів приймання та заготівлі вторинної сировини не забезпечує повноцінного вирішення проблеми, оскільки в області недостатньо розвинені потужності для системного сортування, оброблення й перероблення основних ресурсоцінних фракцій відходів. У більшості громад система поводження з відходами фактично зводиться до контейнерного збирання, вивезення та захоронення, тоді як сортування, компостування органічних відходів, підготовка вторинної сировини, перероблення будівельних та інертних матеріалів, а також безпечне збирання небезпечних побутових компонентів залишаються недостатньо розвиненими. Це обмежує доступність легальних способів поводження з відходами для частини населених пунктів, особливо сільських і віддалених, та підвищує ризик неформального скидання відходів на малоконтрольованих територіях.

Окремим викликом для Миколаївської області є утворення відходів від руйнувань унаслідок бойових дій. Станом на 01.01.2025 р. у громадах області, розташованих у районі проведення воєнних дій, було зафіксовано 82759,048 т таких відходів. Їх безпечне збирання, тимчасове зберігання, сортування, повторне використання або перероблення потребують спеціально визначених майданчиків, оскільки за відсутності належної інфраструктури будівельні та демонтажні відходи можуть ставати джерелом формування нових стихійних звалищ. Відповідно до Порядку поводження з відходами від руйнувань, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 27.09.2022 № 1073 [27], на початок 2025 р. в області було визначено та затверджено сім місць тимчасового зберігання таких

відходів для Миколаївської міської, Снігурівської міської, Новобузької міської, Інгульської сільської, Привільненської сільської та Шевченківської сільської територіальних громад. Один із визначених майданчиків у Миколаївській міській територіальній громаді розглядається як складова майбутнього комплексу з перероблення відходів від руйнувань, для чого за підтримки іноземних донорів громаді було передано 24 одиниці спеціалізованої техніки для їх оброблення [29].

Результати аналізу чинників формування несанкціонованих сміттєзвалищ та практики їх ліквідації в Миколаївській області свідчать, що запобігання повторному засміченню має ґрунтуватися на профілактичному підході. Такий підхід передбачає поєднання управлінських, інфраструктурних, контрольних та інформаційних рішень, спрямованих на усунення причин нелегального скидання відходів. Узагальнений комплекс основних заходів подано на рис. 4.

Реалізація профілактичного підходу насамперед потребує посилення планового управління на рівні територіальних громад та розвитку доступної інфраструктури збирання відходів. Місцеві програми мають враховувати проблемні ділянки, відповідальних виконавців, джерела фінансування й механізми подальшого контролю за очищеними територіями. Водночас необхідно забезпечувати зручне розміщення контейнерних майданчиків, оптимізацію графіків вивезення та розширення охоплення послугами, особливо у приватному секторі, на околицях міст і в сільських населених пунктах.

Окремим напрямом є створення офіційних і доступних способів збирання та передавання проблемних фракцій відходів, які найчастіше потрапляють до стихійних звалищ. Йдеться про будівельні, великогабаритні, рослинні, електронні та небезпечні побутові відходи, для яких доцільно організовувати спеціальні майданчики, пункти приймання або періодичне вивезення за заявками. Наявність таких можливостей зменшує ризик нелегального скидання, оскільки населення і малий бізнес отримують зрозумілу та доступну альтернативу неформальному поводженню з відходами.

Важливою складовою профілактики є моніторинг і контроль ризикових ділянок несанкціонованого накопичення відходів. Інвентаризація, картування, фотофіксація та реагування на звернення громадян дають змогу своєчасно виявляти нові осередки засмічення й визначати пріоритетність дій. Після ліквідації звалищ необхідно запобігати повторному використанню очищених ділянок шляхом обмеження під'їзду, встановлення інформаційних попереджень, періодичних оглядів і, за потреби, технічного контролю.

Ефективність запропонованих заходів значною мірою залежить від інформаційно-просвітницької роботи та контролю за неформальним вивезенням відходів. Населення має бути поінформоване про правила сортування, місця приймання окремих фракцій, графіки вивезення, а також про адміністративну, а в окремих випадках і кримінальну відповідальність за засмічення територій. Одночасно доцільно посилювати контроль за перевізниками й орієнтувати населення та суб'єктів господарювання на користування послугами легальних операторів, що знижує ризик вивезення відходів на малоконтрольовані території.

Головні висновки. Проведений аналіз дає підстави розглядати несанкціоновані сміттєзвалища у Миколаївській області як наслідок поєднання інфраструктурних, просторових, управлінських і соціально-поведінкових чинників. Тому ефективне вирішення цієї проблеми має ґрунтуватися не лише на ліквідації вже сформованих осередків засмічення,



Рис. 4. Комплекс заходів із запобігання утворенню та повторному виникненню несанкціонованих сміттєзвалищ

а передусім на усуненні умов, що сприяють їх повторному виникненню. Пріоритетним має стати перехід до профілактичного управління проблемними територіями, орієнтованого на доступність легальних послуг, контроль за ризиковими ділянками та відповідальну поведінку населення.

Для територіальних громад області важливим завданням є запровадження системного обліку й моніторингу місць несанкціонованого накопичення відходів у межах місцевих програм управління відходами та заходів із благоустрою. Доцільно формувати місцеві переліки таких ризикових ділянок із зазначенням їх координат, площі, складу відходів, повторюваності засмічення та близькості до екологічно чутливих об'єктів. Це дасть змогу визначати черговість реагування не лише за фактом наявності звалища, а й за рівнем екологічного ризику. У цьому контексті доцільним є ширше використання GIS-технологій, дистанційного зондування, дрон-зйомки та цифрових платформ громадського моніторингу.

Практичні заходи запобігання мають бути спрямовані на розширення охоплення населення організованим збиранням і вивезенням відходів, розвиток пунктів приймання окремих фракцій відходів, оптимізацію контейнерної мережі та посилення контролю за неформальним вивезенням. Особливої уваги потребують сільські території, приватний сектор, околиці населених пунктів і приміські зони, де ризик стихійного накопичення відходів є найбільш вираженим. Після ліквідації звалищ необхідно забезпечувати подальший контроль за очищеними ділянками, щоб запобігти їх повторному використанню для нелегального скидання.

Доцільним є також розроблення системи індикаторів ефективності профілактичних заходів, зокрема щодо зменшення кількості повторних звалищ, розширення охоплення населення послугами вивезення, розвитку роздільного збирання та скорочення площ засмічених територій. Окремої уваги потребує поводження з будівельними відходами та відходами від руйнувань, оскільки в умовах воєнного стану та післявоєнного відновлення вони можуть посилювати ризики формування нових несанкціонованих сміттєзвалищ.

Література

1. Лелюшок С. В. Вплив несанкціонованих сміттєзвалищ на компоненти довкілля. *Екологічні науки*. 2025. № 1(58). С. 300–308. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.1-58.49.
2. Про управління відходами : Закон України від 20.06.2022 № 2320-IX / Верховна Рада України. *Відомості Верховної Ради України*. 2023. № 17. Ст.75.
3. Національний план управління відходами до 2033 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 27.12.2024 № 1353-р // База даних «Законодавство України». URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/1353-2024-%D1%80 (дата звернення: 07.07.2026).
4. Директива Європейського Парламенту і Ради 2008/98/ЄС від 19 листопада 2008 року про відходи та про скасування деяких директив. Європарламент від 19.11.2008 № 2008/98/ЄС // База даних «Законодавство України». URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/984_029-08 (дата звернення: 07.07.2026).
5. Директива Ради 1999/31/ЄС від 26 квітня 1999 року про захоронення відходів. Рада Європейського Союзу від 26.04.1999 № 1999/31/ЄС // База даних «Законодавство України». URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/994_925 (дата звернення: 07.07.2026).
6. United Nations Environment Programme. Global Waste Management Outlook 2024: Beyond an age of waste – Turning rubbish into a resource. Nairobi, 2024. 116 p. URL: https://www.unep.org/resources/global-waste-management-outlook-2024 (дата звернення: 07.07.2026).
7. Du L., Xu H., Zuo J. Status quo of illegal dumping research: way forward. *Journal of Environmental Management*. 2021. Vol. 290. Article 112601. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112601.
8. Syafrudin S., Ramadan B. S., Budihardjo M. A., Munawir M., Khair H., Rosmalina R. T., Ardiansyah S. Y. Analysis of factors influencing illegal waste dumping generation using GIS spatial regression methods. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, No. 3. Article 1926. DOI: https://doi.org/10.3390/su15031926.
9. Fraternali P., Morandini L., Herrera González S. L. Solid waste detection, monitoring and mapping in remote sensing images: a survey. *Waste Management*. 2024. Vol. 189. P. 88–102. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.08.003.
10. Rossit D. G., Nesmachnow S. Waste bins location problem: a review of recent advances in the storage stage of the municipal solid waste reverse logistic chain. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 342. Article 130793. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130793.
11. Swarnakar V., Khalfan M. Circular economy in construction and demolition waste management: an in-depth review and future perspectives in the construction sector. *Smart and Sustainable Built Environment*. 2024. DOI: https://doi.org/10.1108/SASBE-02-2024-0056.
12. European Commission. A new Circular Economy Action Plan. For a cleaner and more competitive Europe: Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions COM (2020) 98 final. Brussels, 2020. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0098 (дата звернення: 07.07.2026).
13. Стратічук Н. В. Проблема накопичення відходів та оптимізація шляхів поводження з ними. *Таврійський науковий вісник*. 2020. № 111. С. 285–291. DOI: https://doi.org/10.32851/2226-0099.2020.111.38.
14. Березюк О. В., Лемешев М. С. Вплив доходів населення на обсяги утворення твердих побутових відходів в Україні. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2022. № 3. С. 1–6. URL: https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/download/659/623/835 (дата звернення: 07.07.2026).

15. Герасимчук Л. О., Валерко Р. А., Долінська Н. Ф., Вітер О. В. Аналіз стратегій поводження з твердими побутовими відходами в умовах Коростишівської територіальної громади. *Екологічні науки*. 2023. № 2(47). С. 222–227. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.2-47.36.
16. Дмитруха Т. І., Черняк Л. М., Фролов В. Ф., Петрусенко В. П., Лапань О. В., Кондакова Т. С., Трофімов І. Л., Полив'ян Ю. В. Еколого-математичний аналіз небезпеки полігону побутових відходів для довкілля (на прикладі Фастівського району). *Екологічні науки*. 2024. № 2(53). С. 72–76. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.2-53.10.
17. Симочко Л. Ю., Гафіяк О. В., Дем'янюк О. С. Біоіндикація ґрунту несанкціонованих сміттєзвалищ у Карпатському регіоні. *Агроекологічний журнал*. 2021. № 2. С. 35–45. DOI: https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.2021.234453.
18. Домусчи С. В., Тригуб В. І. Негативний вплив несанкціонованих сміттєзвалищ на ґрунтовий покрив: оцінка та шляхи мінімізації. *Слобожанський науковий вісник. Серія: Природничі науки*. 2025. № 1. С. 64–70. DOI: https://doi.org/10.32782/naturalspu/2025.1.10.
19. Дмитрик О. Формування ефективних систем поводження з побутовими відходами на місцевому рівні. *Економіка та суспільство*. 2024. № 70. DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-70-7.
20. Екологія Миколаївської області : монографія / І. В. Наконечний, І. О. Мазур, Г. Г. Трохименко, С. М. Літвак, Ю. О. Наконечна, С. В. Мельничук, Ю. Г. Дмитрук, Ю. В. Сушко, І. О. Щербина ; за ред. І. В. Наконечного. Миколаїв : НУК, 2022. 313 с.
21. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Миколаївській області у 2024 році. Миколаїв: Управління екології та природних ресурсів Миколаївської обласної військової адміністрації, 2025. 229 с.
22. Коханчук А. Від реформи до реальності: як Миколаївщина бореться зі сміттям без регіонального плану. 2025. 3 листопада. URL: https://nikvesti.com/articles/310385-reforma-upravlinnia-vidkhodamy-shcho-zminylosia-na-mykolaivshchyni. (дата звернення: 09.07.2026).
23. Робота зі зверненнями громадян у 2025 році: цифри та результати. Державна екологічна інспекція Південно-Західного округу: офіційний вебсайт. 2026. 16 січня. URL: https://sw.dei.gov.ua/post/robota-zi-zvernennyami-gromadyan-u-2025-rotsi-tsifri-ta-rezultati (дата звернення: 09.07.2026).
24. Стихійні сміттєзвалища під прицілом ПЕК: рейди в громадах Первомайського району Миколаївщини. Державна екологічна інспекція Південно-Західного округу: офіційний вебсайт. 2025. 19 грудня. URL: https://www.sw.dei.gov.ua/post/5041
25. Прибрано стихійне сміттєзвалище на березі Південного Бугу. Державна екологічна інспекція Південно-Західного округу : офіційний вебсайт. 2025. 1 вересня. URL: https://sw.dei.gov.ua/post/4646 (дата звернення: 09.07.2026).
26. Комплексна програма охорони довкілля Миколаївської області на 2021-2027 роки. Затверджено рішенням Миколаївської обласної ради 23.12.2020 р. № 16. URL: https://ecolog.mk.gov.ua/ua/programs/KP2127/ (дата звернення: 12.07.2026).
27. Порядок управління відходами, що утворились у зв'язку з пошкодженням (руйнуванням) будівель та споруд внаслідок бойових дій, терористичних актів, диверсій або проведенням робіт з ліквідації їх наслідків та внесення змін до деяких постанов Кабінету Міністрів України : Постанова Кабінету Міністрів України від 27.09.2022 № 1073 // База даних «Законодавство України». URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1073-2022-%D0%BF (дата звернення: 07.07.2026).
28. Попович Н.П., Мальований М.С., Попович В.В. Підвищення регіональної екологічної безпеки шляхом удосконалення логістичної системи поводження з відходами. *Екологічні науки*. 2018. № 1(20). Т. 2. С. 11-14.
29. Екологічний паспорт Миколаївської області за 2024 рік. Затверджений Миколаївською обласною військовою адміністрацією 26.08.2025. URL: https://ecolog.mk.gov.ua/store/files/1758179681.pdf. (дата звернення: 07.07.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 16.07.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

УДК 628.4
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.53

ОЦІНЮВАННЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ІЄРАРХІЇ УПРАВЛІННЯ ПОБУТОВИМИ ВІДХОДАМИ У РЕГІОНАЛЬНОМУ ПЛАНІ МІСТА КИЄВА

Перебинос А.Р. (orcid.org/0000-0003-0565-9413)
Київський національний університет будівництва і архітектури
пр. Повітряних Сил, 31, 03037, м. Київ
perebynos.ar@knuba.edu.ua

У статті досліджено повноту та фактичну зорієнтованість реалізації ієрархії управління побутовими відходами у Регіональному плані управління відходами міста Києва до 2035 року. Актуальність теми зумовлена відсутністю у чинній методиці розроблення таких планів формалізованих механізмів перевірки відповідності змісту запланованих заходів пріоритетним рівням ієрархії, що створює ризики декларативного дотримання принципів циркулярної економіки за фактичного домінування технологій енергетичного відновлення та захоронення. За допомогою методу контент-аналізу за критеріями повноти представлення, спрямованості заходів, типів інструментів реалізації, фінансового забезпечення та моніторингу здійснено детальну оцінку завдань і заходів плану міста Києва. Результати дослідження показали, що запобігання утворенню та підготовка до повторного використання побутових відходів у документі представлені вкрай обмежено, тоді як рециклінг, енергетичне відновлення та захоронення охоплюють найбільшу частку завдань і заходів. Зокрема, на енергетичне відновлення припадає понад 45,8 % загальних фінансових потреб інфраструктури для оброблення побутових відходів. Водночас орієнтація на домінуючу технологію спалювання створює «lock-in»-ефект, оскільки вона потребує стабільного постачання побутових відходів, стимулює їхню генерацію, гальмує впровадження вищих щаблів ієрархії та суперечить принципам циркулярної економіки щодо забезпечення тривалих і повторюваних циклів використання наявних ресурсів. У висновках обґрунтовано практичні рекомендації щодо переорієнтації плану на розвиток роздільного збирання побутових відходів у джерелі їх утворення, розширення потужностей сортування і компостування, а також посилення інструментів запобігання утворенню та повторного використання відходів на міському рівні. *Ключові слова:* побутові відходи, ієрархія управління відходами, циркулярна економіка, план управління відходами.

Assessment of the implementation of the municipal waste management hierarchy in the Regional Plan of the city of Kyiv. Perebynos A.

The article examines the completeness and actual orientation of the implementation of the hierarchy of municipal waste management in the Regional Waste Management Plan of the city of Kyiv until 2035. The relevance of the topic is due to the absence in the current methodology for developing such plans of formalised mechanisms for checking the content of planned measures with the priority levels of the hierarchy, which creates risks of declarative adherence to the principles of the circular economy with the actual dominance of disposal technologies. Using the content analysis method, a detailed assessment of the tasks and measures of the Kyiv city plan was carried out using the criteria of completeness of presentation, focus of measures, types of implementation instruments, financial support and monitoring. The results of the study showed that the prevention of the formation and preparation for reuse of municipal waste are presented in the document in an extremely limited manner, while recycling, energy recovery and disposal cover the largest share of tasks and measures. In particular, energy recovery accounts for more than 45.8 % of the total financial needs of the infrastructure for municipal waste treatment. At the same time, the focus on the dominant incineration technology creates a «lock-in» effect, as it requires a stable supply of municipal waste, stimulates its generation, inhibits the implementation of higher levels of the hierarchy and contradicts the principles of the circular economy to ensure long and repeated cycles of use of available resources. The conclusions substantiate practical recommendations for reorienting the plan to develop separate collection of municipal waste at the source of its generation, expanding sorting and composting capacities, as well as strengthening waste prevention and reuse initiatives at the city level. *Key words:* municipal waste, waste management hierarchy, circular economy, waste management plan.

Постановка проблеми. Ієрархія управління відходами – запобігання утворенню, підготовка до повторного використання, рециклінг, відновлення з отриманням енергії та видалення – закріплена ЗУ «Про управління відходами» [1] як обов'язковий принцип планування, адаптований з Директиви 2008/98/ЄС. Розроблення регіональних планів управління відходами (РПУВ) розпочалося після затвердження Національного плану управління відходами до 2033 року (НПУВ) у грудні 2024 року [2], однак чинна методика розроблення РПУВ не передбачає формалізованого способу перевірки того, наскільки зміст конкретних завдань і заходів документа фактично відповідає пріоритетності визначених рівнів ієрархії, а не лише декларує її дотримання на рівні формулювань. Відсутність такого механізму допускає затвердження РПУВ, які формально відповідають вимогам законодавства, але фактично не

© Перебинос А.Р., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

забезпечують пріоритетного впровадження вищих рівнів ієрархії. Метою дослідження є встановлення методом контент-аналізу за визначеними критеріями, чи відображає РПУВ м. Києва [3] реальну пріоритетність вищих рівнів ієрархії управління побутовими відходами (ПВ), чи основний акцент залишається на технологіях їх видалення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз публікацій дослідників за останні роки, присвячених плануванню у сфері управління відходами, засвідчує переваження трьох тематичних напрямів. Перший – теоретико-концептуальний, у якому ієрархія управління відходами та принципи циркулярної економіки розглядаються абстрактно, здебільшого через зіставлення нормативних моделей ЄС і України або через визначення бар'єрів переходу до циркулярної економіки, без прив'язки до конкретного планувального документа [4-6]. Другий – правовий, зосереджений на гармонізації національного законодавства з європейським у сфері відходів, виключно з аналізом впровадження принципу ієрархії на рівні норм закону [7, 8]. Третій – описово-статистичний, представлений регіональними дослідженнями стану управління ПВ, які спираються на офіційну статистику як базис для обґрунтування майбутніх регіональних планів, однак обмежуються констатацією поточної ситуації, а не оцінюванням змісту вже розроблених документів [9, 10].

Попри тематичну різноманітність, серед опрацьованих публікацій жодна не застосовує формалізованого методу оцінювання того, наскільки конкретний план управління відходами фактично реалізує пріоритетність рівнів ієрархії та принципів циркулярної економіки. Наявні дослідження або описують нормативну модель ієрархії абстрактно, або аналізують передумови розроблення плану, залишаючи поза увагою верифікацію відповідності вже розробленого чи затвердженого документа задекларованим принципам.

Методологічне забезпечення. Матеріалом дослідження став РПУВ міста Києва до 2035 року [3]. Об'єктом дослідження є система стратегічного планування управління ПВ, представлена у РПУВ, а предметом – завдання та заходи, передбачені планом для реалізації різних рівнів ієрархії управління відходами. Для оцінювання документа застосовано метод контент-аналізу за попередньо визначеними критеріями (табл. 1). Під час опрацювання документа кожне завдання та захід відносили до одного або кількох рівнів ієрархії управління відходами відповідно до їх змісту та очікуваного результату, тому сумарна кількість або частка завдань і заходів для всіх рівнів ієрархії перевищує їх загальну кількість. Для кожного рівня ієрархії визначали повноту його представлення у РПУВ за кількістю та часткою відповідних завдань і заходів, а також оцінювали відповідність запропонованих заходів сутності відповідного рівня ієрархії, типи інструментів їх реалізації, наявність фінансового забезпечення та індикаторів моніторингу.

Виклад основного матеріалу. ***Запобігання утворенню ПВ*** як окремий рівень ієрархії у РПУВ фактично не представлено. Документ не містить стратегічної цілі, завдань або заходів, безпосередньо спрямованих на скорочення утворення ПВ. Відповідно до запропонованої методики контент-аналізу до цього рівня опосередковано віднесено Завдання 1.3 «Підвищення рівня обізнаності населення щодо управління відходами» та дотичні інформаційно-освітні заходи, оскільки формування екологічно відповідальної поведінки населення потенційно може сприяти запобіганню утворенню ПВ. Але у документі не конкретизовано, що інформаційні кампанії чи освітні заходи будуть спрямовані саме на популяризацію практик запобігання утворенню відходів. Для зазначених заходів визначено відповідальних виконавців, строки реалізації, джерела фінансування та індикатори виконання, що свідчить про їх належне організаційне забезпечення. Перелічені завдання та заходи забезпечили 21 % представлення цього рівня ієрархії у плані (табл. 2). Однак нормативно-правові, економічні, організаційно-управлінські чи інфраструктурні інструменти,

Таблиця 1

Критерії контент-аналізу відповідності РПУВ рівням ієрархії управління відходами

Критерій	Характеристика	Форма представлення
Повнота представлення	Кількість завдань і заходів, віднесених до відповідного рівня ієрархії	Кількість (n) та/або частка (%) завдань і заходів
Спрямованість заходів	Ступінь відповідності запланованих заходів сутності відповідного рівня ієрархії управління відходами.	Пряма / Опосередкована
Типи інструментів реалізації	Домінуючі інструменти реалізації заходів	Нормативно-правові, організаційні, інфраструктурні, економічні, інформаційно-просвітницькі
Фінансове забезпечення	Наявність визначених джерел та/або обсягів фінансування заходів.	Передбачено / Частково передбачено / Не визначено
Моніторинг виконання	Наявність індикаторів для оцінювання виконання завдань і заходів.	Кількісні / Якісні / Відсутні

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

які безпосередньо стимулюють запобігання утворенню відходів, у РПУВ не передбачені. Система моніторингу також не містить окремих показників, що характеризували б досягнення цього рівня ієрархії, навпаки – прогнозні показники утворення ПВ демонструють їх зростання протягом періоду реалізації плану.

Підготовка до повторного використання ПВ представлена в РПУВ більшою мірою, ніж запобігання їх утворенню. Рівень представлений завданням 2.1 «Розвиток інфраструктури збирання та перевезення ПВ», у межах якого передбачено захід 2.1.1 «Пункти роздільного збирання ПВ, для яких не встановлено системи розширеної відповідальності виробника». Для заходу визначено конкретний результат – створення 10 пунктів роздільного збирання з фінансування з бюджету міста в обсязі 320 млн грн.

Реалізація цього рівня ієрархії умовно спирається на організаційно-управлінські та інфраструктурні інструменти, які доповнюють інформаційно-освітні заходи, віднесені у даному аналізі до всіх рівнів ієрархії. Захід 2.1.1 одночасно віднесено до підготовки до повторного використання та рециклінгу, оскільки створення пунктів роздільного збирання створює передумови для обох напрямів. Однак сам захід не передбачає операцій з підготовки відходів до повторного використання, а його результативність у цьому напрямі окремо не визначена. У системі моніторингу також відсутній окремий індикатор підготовки до повторного використання: передбачено показник обсягу ПВ, щодо яких здійснено операції з рециклінгу, тоді як результати повторного використання окремо не оцінюються. Агрегований цільовий показник підготовки до повторного використання та рециклінгу, наведений у НПУВ та РПУВ, не дає змоги визначити внесок повторного використання. Таким чином, передбачені РПУВ заходи можуть створити інфраструктурні передумови для підготовки деяких фракцій ПВ до повторного використання, проте не забезпечують її безпосередньої реалізації та, за характером запланованих заходів і показників, більшою мірою орієнтовані на рециклінг.

Досягнення ефективного рівня ***рециклінгу*** передбачає насамперед розвиток системи роздільного збирання та інфраструктури для подальшого оброблення ПВ. У РПУВ відповідні заходи передбачені в межах завдання 2.1 «Розвиток інфраструктури збирання та перевезення ПВ» і завдання 2.2 «Розвиток інфраструктури відновлення ПВ» та мають пряме значення для впровадження даного рівня ієрархії. Зокрема, заплановані заходи з оновлення матеріально-технічної бази, створення 10 пунктів роздільного збирання ПВ, будівництво трьох ліній сортування роздільно зібраних ПВ, а також об'єкт анаеробного оброблення біовідходів для виробництва біогазу та п'ять об'єктів компостування відходів від зелених насаджень з об'єктів благоустрою (табл. 3). Для цих заходів визначені строки виконання, відповідальні сторони, індикатори та джерела фінансування. Отже, рециклінг у РПУВ представлений комплексом організаційних та інфраструктурних заходів, доповнений інформаційно-просвітницькими інструментами.

Водночас організаційна модель роздільного збирання має певні прогалини. Для багатоквартирної забудови передбачено окремі контейнери для скла, пластику та «ресурсоцінних відходів», однак склад останньої фракції в документі чітко не визначений. Ще суттєвішою є неповнота планування роздільного збирання біовідходів у складі ПВ. У РПУВ його запровадження визначене як перспективний напрям, а коричневий контейнер для органічної фракції розглядається як подальший неконкретизований розвиток системи. Заплановано роздільне збирання біовідходів насамперед від закладів громадського харчування та торгівлі, при цьому домогосподарства, як основне джерело утворення біовідходів, у системі не охоплені. Водночас зазначено, що повноцінне роздільне збирання біовідходів має передувати створенню об'єкта анаеробного оброблення. Це створює інфраструктурний розрив між запланованим роздільним збиранням і потужностями подальшого оброблення.

Інфраструктурне забезпечення цього рівня ієрархії є найбільш конкретизованою його складовою. За узагальненими розрахунками, сукупна номінальна потужність передбачених об'єктів становить 345 тис. т/рік, або близько 23,5 % прогнозованого утворення ПВ у 2035 р.; з урахуванням наявного проммайданчика ТОВ «Київміськвторресурси» – 360,6 тис. т/рік, або близько 24,6 %. Слід зазначити, що цей показник характеризує масштаб запланованої інфраструктури, функціонально орієнтованої на роздільне збирання та подальше оброблення відходів, а не гарантовану частку фактичного рециклінгу.

Таблиця 2

Охоплення ієрархії управління відходами завданнями та заходами

Значення	Рівень ієрархії управління відходами				
	Запобігання	Повторне використання	Рециклінг	Енергетичне відновлення	Захоронення
К-ть завдань та заходів	7	7	16	15	14
% охоплення	21	21	47	44	41

Таблиця 3

Характеристика об'єктів оброблення побутових відходів

Об'єкти інфраструктури оброблення		К-ть	Потужність, тис. т	% оброблення на 2035 рік	Потреба у фінансуванні, млн грн	% від бюджету
Роздільно зібрані побутові відходи						
Існуючі	Проммайданчик «Київміськвторресурси»	1	15,6	–	–	–
Заплановані	Пункт роздільного збирання	10	100	–	320	–
	Лінії сортування	3	120	–	1 200	–
	Об'єкт компостування відходів від зелених насаджень	5	25	–	125	–
	Об'єкт анаеробного оброблення біовідходів	1	100	–	900	–
Всього			**360,6**	**24,6**	**2 545**	**5,4**
Змішані побутові відходи						
Існуючі	Сортувальна лінія на полігоні № 5	1	55	–	–	–
	Полігон	2	1421,5	–	1000	–
	Сміттєспалювальний завод	1	355	–	–	–
Всього			**1410**	–	–	–
Заплановані	МБО	3	1250	–	12 600	–
	Сміттєспалювальний завод (після реконструкції)	1	300	–	3 000	–
	ТЕЦ на SRF	1	240	–	4 200	–
	ТЕЦ на ПВ	1	450	–	14 780	–
	Полігон	3	800	–	5 600	–
Всього потужностей для первинного оброблення			**1610.6**	–	–	–
Всього потужностей для енергетичного відновлення			**990**	**67,4**	**21 980**	**45,8**
Всього потужностей для видалення			**800**		**6 600**	**13,8**
Всього на об'єкти оброблення ПВ, включаючи управління відходами, що біологічно розкладаються, з інших джерел (без ТЕЦ на біомасі)					**47 959,02**	–

Окремо варто відзначити обмеженість потужностей для оброблення біовідходів: 125 тис. т/рік припадає на анаеробне оброблення та компостування, тоді як прогнозована кількість лише харчових відходів у складі ПВ становить 482,6 тис. т/рік. Це свідчить про значний розрив між масштабом утворення органічної частки ПВ та передбаченими потужностями її оброблення.

Загальний розподіл ПВ між різними технологіями їх оброблення на 2035 р., який не враховує відходи від пунктів роздільного збирання та компостувальних станцій, прогнозує отримання 397,9 тис. т вторинної сировини (27,1 % від утворення ПВ), причому лише 90 тис. т (22,6 %) припадає на нові лінії сортування роздільно зібраних відходів, а решта формується переважно внаслідок оброблення змішаних ПВ. Таким чином, запропонована інфраструктура створює передумови для збільшення рівня матеріального відновлення, однак фактичний відсоток рециклінгу залежатиме від отриманих ресурсоцінних матеріалів з потоку змішаних відходів, а не від роздільного збирання у джерелі утворення. Крім того, передбачено, що 30 тис. т/рік роздільно зібраних відходів після ліній сортування будуть спрямовані на виготовлення RDF-палива. Отже, навіть для окремо зібраного потоку ресурсоцінних відходів близько чверті вхідної маси не передбачається повернення до матеріального циклу, а спрямовується на виробництво палива.

Моніторинг рівня рециклінгу в РПУВ передбачає як інфраструктурні, так і результативні показники. Для останнього показника встановлено послідовне зростання цільового значення від 10 % у 2026 р. до 25 % у 2035 р. Водночас окремого індикатора охоплення населення роздільним збиранням не передбачено; відтак система моніторингу краще відображає створення інфраструктури та кінцевий результат, ніж функціонування первинної ланки, від якої залежить досягнення запланованих показників рециклінгу.

Енергетичне відновлення ПВ (44 %) у РПУВ за кількісним охопленням по задачах та заходах посідає в системі планування майже таке саме місце, як і рециклінг (47 %). Безпосередньо рівень пред-

ставлений завданням 2.2 «Розвиток інфраструктури відновлення ПВ» та заходами з будівництва об'єктів механіко-біологічного оброблення (МБО), ТЕЦ на SRF-паливі, ТЕЦ на побутових відходах (ТЕЦ-7), реконструкції існуючого сміттєспалювального заводу та розроблення проєктної документації для відповідних об'єктів. Заплановані заходи цього рівня ієрархії переважно мають інфраструктурний характер і доповнюються організаційними та інформаційно-просвітницькими інструментами. Для них визначені строки, відповідальні сторони, джерела фінансування та кількісні індикатори виконання.

Масштаб запланованої інфраструктури свідчить про домінуючу роль цього рівня у майбутній системі управління ПВ. У сукупності потужність об'єктів спалювання ПВ становить близько 990 тис. т/рік, або 67,4 % прогнозованого утворення ПВ у 2035 році (табл. 3). РПУВ також передбачає будівництво трьох об'єктів МБО загальною потужністю 1,25 млн т/рік. Водночас МБО є технологічною ланкою попереднього оброблення змішаних ПВ, а не власне об'єктом енергетичного відновлення, тому їх віднесення до цього рівня відображає функціональний зв'язок із виробництвом палива з відходів, а не тотожність технологій.

Фінансове забезпечення також демонструє високу пріоритетність цього напряму. За узагальненою оцінкою передбачених у РПУВ об'єктів для оброблення ПВ, потреба у фінансуванні інфраструктури, пов'язаної з енергетичним відновленням, становить 21,98 млрд грн, або 45,8 % відповідної загальної потреби, що є значною концентрацією ресурсів на нижчому щаблі ієрархії. Це свідчить, що енергетичне відновлення не лише широко представлене в переліку заходів, а й має значний ресурсний пріоритет у структурі запланованого розвитку системи.

Моніторинг цього рівня є достатньо розвиненим: передбачено окремі індикатори будівництва об'єктів, а також результативний показник – частку утворених ПВ, щодо яких здійснено операції з відновлення (спалювання з отриманням енергії). Для останнього встановлено щорічні цільові значення, що зростають із 12 % у 2026 р. до 30 % у 2035 р. Отже, на відміну від запобігання утворенню чи підготовки до повторного використання відходів, для енергетичного відновлення визначено кількісні та якісні показники.

Захоронення ПВ охоплює 41 % завдань і заходів РПУВ, що є близьким до показників рециклінгу (47 %) та енергетичного відновлення (44 %). За характером запланованих інструментів цей рівень представлений переважно інфраструктурними та організаційними рішеннями. Безпосередньо цьому рівню відповідають завдання 2.3 «Розвиток інфраструктури видалення ПВ» та 2.4 «Очищення історичних місць розміщення відходів», у межах яких передбачено будівництво трьох полігонів ПВ та рекультивацію двох діючих об'єктів захоронення. До цього рівня також віднесено будівництво об'єктів МБО, оскільки вони забезпечують попереднє оброблення ПВ перед остаточним видаленням змішаних відходів згідно з правилами технічної експлуатації полігонів [11]. Фінансове забезпечення передбачених об'єктів є значним – 13,8 % від загальної потреби системи управління ПВ. Моніторинг захоронення сформований достатньо чітко та включає як інфраструктурні, так і результативні показники. Для рекультивації передбачено окремі індикатори виконання, а для системи в цілому встановлено показник частки утворених ПВ, щодо яких здійснено операції із захоронення.

Порівняння рівнів ієрархії показало, що їх кількісна представленість у РПУВ не повністю відображає фактичні пріоритети розвитку системи управління ПВ. Найвищі рівні ієрархії – запобігання утворенню та підготовка до повторного використання – представлені обмежено, тоді як рециклінг, енергетичне відновлення та захоронення охоплюють близькі частки завдань і заходів. Водночас відмінності у масштабі передбаченої інфраструктури, фінансовому забезпеченні та системі моніторингу свідчать про нерівномірність опрацювання окремих рівнів. Таким чином, для оцінювання орієнтації будь-якого плану на певні рівні ієрархії та циркулярну економіку недостатньо враховувати лише кількість передбачених завдань та заходів, а необхідно також враховувати їхній зміст, типи інструментів, фінансове забезпечення та очікувані результати.

Висновки. Загалом РПУВ міста Києва передбачає масштабний комплекс інфраструктурних та фінансово забезпечених заходів щодо розвитку системи управління ПВ. Водночас суттєвою прогалиною залишається недостатня конкретизація організації роздільного збирання, особливо біовідходів від домогосподарств. Попри формальне охоплення різних рівнів ієрархії, номінальні потужності інфраструктурних об'єктів та їх фінансове забезпечення свідчать про виразний акцент на енергетичному відновленні – нижчому рівні порівняно з рециклінгом, повторним використанням чи запобіганням утворенню відходів.

Такий підхід створює ризик «lock-in»-ефекту [12]: капіталомістка інфраструктура, що потребує стабільного потоку відходів, обмежує перехід до циркулярної економіки та суперечить логіці ієрархії управління відходами ЄС, відповідно до якої спалювання та захоронення мають застосовуватися до потоків, непридатних для повторного використання чи рециклінгу.

Для посилення відповідності РПУВ принципам циркулярної економіки доцільно змістити пріоритети розвитку системи управління ПВ на роздільне збирання у джерелі утворення та збільшення потужностей сортування, компостування та анаеробного оброблення. Важливим доповненням може стати співпраця з ОСББ, закладами освіти та іншими локальними суб'єктами для розвитку децентралізованого компостування.

Водночас МБО доцільно розглядати як етап попереднього оброблення змішаних відходів перед захороненням, а не як основу для формування стабільного потоку сировини для виробництва палива з відходів [13]. Для об'єктів енергетики слід передбачити технології когенерації та можливість використання біомаси як альтернативної сировини замість формування довгострокової залежності від ПВ.

Паралельно необхідно посилити заходи найвищих рівнів ієрархії – запобігання утворенню та повторне використання ПВ. На рівні міста такими інструментами можуть бути обмеження використання одноразових виробів під час громадських заходів [14], підтримка продовольчих банків та ініціатив із запобігання утворенню харчових відходів, а також розвиток ремонтних сервісів [15]. Такі заходи дозволили б змістити фокус міської системи від управління вже утвореними відходами до збереження ресурсів, що відповідає логіці циркулярної економіки.

Перспективи використання результатів дослідження. Застосований у роботі метод контент-аналізу, попри можливість подальшого вдосконалення критеріїв та способів кількісного оцінювання, може бути використаний як відтворювальний підхід для порівняльного оцінювання планів управління відходами в Україні, зокрема для визначення того, наскільки передбачені в них заходи відповідають пріоритетній послідовності впровадження ієрархії управління відходами та принципам циркулярної економіки.

Література

1. Про управління відходами : Закон України від 20 черв. 2022 р. № 2320-IX // Відомості Верховної Ради України. 2023. № 4. Ст. 30. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text (дата звернення: 30.08.2026).
2. Про затвердження Національного плану управління відходами до 2033 року та визнання такими, що втратили чинність, деяких актів : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 27 грудня 2024 р. № 1353-р // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/1353-2024-%D1%80 (дата звернення: 30.08.2026).
3. Про затвердження Регіонального плану управління відходами у місті Києві до 2035 року : Розпорядження Київської міської військової адміністрації від 28 лип. 2026 р. № 984. URL: https://kyivcity.gov.ua/npa/pro_zatverdzhennya_regionalnogo_planu_upravlinnya_vidkhodami_u_misti_kiyevi_do_2035_roku/ (дата звернення: 30.08.2026).
4. Дубневич Ю. В., Войнича Л. Є., Дубневич Н. Ю. Ієрархія управління відходами: європейська та українська моделі. *Аграрна економіка*. 2022. Т. 15, № 1–2. С. 53–60. DOI: https://doi.org/10.31734/agrarecon2022.01-02.053
5. Horbal, N. I., Adamiv, M. Y., Chumak, A. S. Adaptation of circular economy principles to waste management in Ukraine. *Journal of Lviv Polytechnic National University. Series of Economics and Management Issues*. 2020. Vol. 4, no. 1. P. 159–166. DOI: https://doi.org/10.23939/semi2020.01.159
6. Кривенко С. Модернізація системи управління відходами у контексті циркулярної економіки. *Економіка та суспільство*. 2024. № 68. DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-68-142
7. Shpak, N., Kuzmin, O., Melnyk, O., Ruda, M., Sroka, W. Implementation of a circular economy in Ukraine: The context of European integration. *Resources*. 2020. Vol. 9, no. 8. P. 96. DOI: https://doi.org/10.3390/resources9080096
8. Кондратюк Т. М. Управління відходами: правовий аспект. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія Право*. 2025. Вип. 87, ч. 2. С. 206–210. DOI: https://doi.org/10.24144/2307-3322.2025.87.2.30
9. Гнатюк Н. О., Слободяник Г. А. Стан щодо поводження з твердими побутовими відходами в Черкаській області. *Науковий вісник Вінницької академії безперервної освіти. Серія «Екологія. Публічне управління та адміністрування»*. 2024. № 1 (5). С. 9–16. DOI: https://doi.org/10.32782/2786-5681-2024-1.02
10. Safranov, T. A., Shanina, T. P., Prykhodko, V. Y. Prerequisites for formation and implementation of a municipal solid waste management plan in Odesa Region. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*. 2021. № 27. P. 86–96. DOI: https://doi.org/10.31481/uhmj.27.2021.09
11. Про затвердження Правил технічної експлуатації полігонів, припинення експлуатації, рекультивації та догляду за полігонами після припинення їх експлуатації: Наказ № 263 від 10 лютого 2025 р. Київ: Міндовкілля України, 2025. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0405-25#Text
12. Мартиненко А. Міф про безпечне сміттєспалювання / ГС Український Альянс Нуль Відходів, 2023. 74с. URL: https://zerowaste.org.ua/2023/04/10/mif-pro-smittyespalyuvannya/ (дата звернення: 30.08.2026).
13. Перебинос А. Р. Порівняльна оцінка підходів механіко-біологічного оброблення змішаних побутових відходів в Україні // *Комунальне господарство міст. Серія: Інформаційні технології та інженерія*. 2025. Т. 6, № 194. С. 82–95. DOI: https://doi.org/10.33042/3083–6727–2025–6–194–82–95
14. Packaging reuse at events: Portfolio of case studies / GIZ, ICLEI. Bonn : GIZ, 2025. URL: https://www.giz.de/sites/default/files/media/pkb-document/2025-12/giz2025-en-iclei-case-study-packaging-reuse-events.pdf (дата звернення: 30.08.2026).
15. Покроковий гайд з реалізації інфраструктурних проєктів у сфері управління відходами / ГС «Український альянс нуль відходів» ; ред. С. Каритун. 2026. 188 с. URL: https://zerowaste.org.ua/2026/07/13/ (дата звернення: 30.08.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 31.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

УДК 628.477:504.06:502.131.1
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.54

THE SYSTEM OF SUSTAINABLE MANAGEMENT OF DEMOLITION WASTE: PRINCIPLES, METHODS AND PROSPECTS FOR DEVELOPMENT

Sorochynska O.L.[1] (orcid.org/0000-0003-2477-1275),
Khrutba V.O.[1] (orcid.org/0000-0002-8121-2042),
Ishchenko V.A.[2] (orcid.org/0000-0002-8464-1096),
Kolomiets S.V.[1] (orcid.org/0000-0001-9825-8904)
[1] National Transport University
Omelianovycha-Pavlenka str. 1, 02000, Kyiv
[2] Vinnytsia National Technical University
Khmelnytske Highway, 95, 21000, Vinnytsia
ellena06.84@ukr.net, ischenko.v.a@vntu.edu.ua

The full-scale war in Ukraine caused large-scale destruction of residential, industrial, transport and engineering infrastructure, which led to the formation of unprecedented volumes of destruction waste. Existing waste management systems formed to function in peacetime conditions have proven insufficiently adapted to the treatment of such waste streams. As of September 2025, about 17.2 million tons of waste have accumulated in the Ukrainian Government-controlled area alone, of which approximately 11.7 million tons need to be cleared, sorted and recycled. The considerable heterogeneity of waste composition, the presence of potentially hazardous components, limited resources and damage to infrastructure make it difficult to manage and reuse it safely.

The purpose of the study is to substantiate the theoretical foundations and develop a conceptual model of the system of sustainable management of destruction waste in the conditions of the post-war recovery of Ukraine. The methodological basis of the work is a systematic approach, content analysis of international and national regulatory documents, comparative analysis of modern practices of construction waste management and generalization of the results of scientific research in the field of circular economy.

As a result of the study, a system of interrelated principles of sustainable waste management of destruction was formed, which includes the principles of waste management hierarchy, material life cycle, circularity, extended responsibility, proximity, digital transparency and institutional coordination. A classification of management methods covering mechanical, thermochemical, biological, digital and organizational and economic methods is proposed. Conceptual and structural models of the management system have been developed, which integrate regulatory, technological, digital, economic, institutional and environmental components into a single management decision support system.

It is shown that up to 70% of the residual volume of waste from military destruction, which is about 8.2 million tons, can potentially be involved in reuse or processing as secondary material resources, provided that the relevant infrastructure is developed, digital systems for the traceability of material flows are implemented and economic incentives are created for the use of secondary raw materials. The proposed approach contributes to the implementation of the principles of the circular economy, reducing the volume of waste disposal, increasing resource efficiency and forming scientifically based mechanisms for the post-war recovery of Ukraine.
Key words: sustainable development, demolition waste, circular economy, waste management system, waste hierarchy, digitalisation, post-war reconstruction, CDW.

Система сталого управління відходами руйнації: принципи, методи та перспективи розвитку. Сорочинська О.Л., Хрутьба В.О., Іщенко В.А., Коломієць С.В.

Повномасштабна війна в Україні спричинила масштабні руйнування житлової, промислової, транспортної та інженерної інфраструктури, що призвело до утворення безпрецедентних обсягів відходів руйнації. Існуючі системи управління відходами, сформовані для функціонування в умовах мирного часу, виявилися недостатньо пристосованими до оброблення таких потоків відходів. Станом на вересень 2025 року лише внаслідок пошкодження та знищення житлового фонду на підконтрольній Уряду України території накопичилося близько 17,2 млн т відходів, з яких приблизно 11,7 млн т потребують розчищення, сортування та перероблення. Значна неоднорідність складу відходів, наявність потенційно небезпечних компонентів, обмеженість ресурсів та пошкодження інфраструктури ускладнюють їх безпечне управління та повторне використання.

Метою дослідження є обґрунтування теоретичних засад та розроблення концептуальної моделі системи сталого управління відходами руйнації в умовах післявоєнного відновлення України. Методологічною основою роботи є системний підхід, контент-аналіз міжнародних і національних нормативно-правових документів, порівняльний аналіз сучасних практик управління будівельними відходами та узагальнення результатів наукових досліджень у сфері циркулярної економіки.

У результаті дослідження сформовано систему взаємопов'язаних принципів сталого управління відходами руйнації, яка включає принципи ієрархії управління відходами, життєвого циклу матеріалів, циркулярності, розширеної відповідальності, наближеності, цифрової прозорості та інституційної координації. Запропоновано класифікацію методів управління, що охоплює механічні, термохімічні, біологічні, цифрові та організаційно-економічні методи. Розроблено концептуальну та струк-

© Sorochynska O.L., Khrutba V.O., Ishchenko V.A., Kolomiets S.V., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

турну моделі системи управління, які інтегрують нормативно-правову, технологічну, цифрову, економічну, інституційну та екологічну складові в єдину систему підтримки управлінських рішень.

Показано, що до 70 % залишкового обсягу відходів воєнної руйнації, що становить близько 8,2 млн т, потенційно можуть бути залучені до повторного використання або перероблення як вторинні матеріальні ресурси за умови розвитку відповідної інфраструктури, впровадження цифрових систем простежуваності матеріальних потоків та створення економічних стимулів для використання вторинної сировини. Запропонований підхід сприяє реалізації принципів циркулярної економіки, зменшенню обсягів захоронення відходів, підвищенню ресурсоефективності та формуванню науково обґрунтованих механізмів післявоєнного відновлення України. *Ключові слова:* сталий розвиток, відходи руйнації, циркулярна економіка, система управління відходами, ієрархія управління відходами, цифровізація, післявоєнна відбудова, CDW.

Statement of the problem. Full-scale armed aggression against Ukraine caused large-scale destruction of residential, industrial, transport and engineering infrastructure. An international RDNA3 study conducted with the participation of the World Bank, the European Commission and the United Nations estimates that the volume of destruction waste in Ukraine is measured in millions of tons [1]. According to more recent data from the United Nations Development Programme, as of September 2025, approximately 17.2 million tons of waste had accumulated within the damaged and destroyed housing stock in the controlled area alone, of which about 11.7 million tons still need to be cleared, sorted and recycled [6; 7].

Existing waste management systems in Ukraine were formed for peacetime conditions and are not designed for such extraordinary loads. Much of the sorting, recycling and safe storage infrastructure is damaged or destroyed, and the regulatory framework did not, until recently, contain systematic mechanisms to control the preparation of destruction waste for reuse [8]. This leads to chaotic accumulation and placement of waste at landfills, increases the risks of soil, water bodies and air pollution.

At the same time, destruction waste, subject to the application of the principles of the circular economy, can be considered not only as an environmental problem, but also as an important resource for reconstruction. Therefore, it is not a separate technological or economic measure that is relevant, but the formation of a holistic system of sustainable management of destruction waste – with clearly defined principles, classified methods and a coherent institutional model.

Relevance of the study. Reconstruction of Ukraine requires significant volumes of building materials and energy resources, access to which is limited in the war and post-war periods. An important step in the formation of state policy in this area was the approval of the Action Plan for the implementation of the National Waste Management Plan for 2025–2033, which provides for the improvement of the waste management system from destruction, the conduct of analytical studies and the development of economic models for the management of such waste, as well as the creation of the necessary infrastructure, in particular, the formation of a network of local and regional mobile installations for the treatment of waste from destruction. A further step was the approval by the Cabinet of Ministers of Ukraine in February 2026 of the procedure for implementing the target indicators for the preparation of construction waste and destruction waste for reuse, processing and other material recovery, which imposes on enterprises that generate such waste the obligation to submit relevant declarations and annual monitoring of processing indicators [9; 10].

At the same time, the approximation of the Ukrainian regulatory framework to the requirements of the EU Framework Directive on Waste (2008/98/EC), which defines the hierarchy of waste management as the main methodological reference point, continues [2; 3]. In this context, the study of the principles and methods of building a system of sustainable management of destruction waste is relevant not only from an ecological, but also from an integration point of view, as it corresponds to Ukraine's course towards European integration and the formation of a transparent market for secondary building materials.

The connection of the work with important scientific and practical tasks. The study of the system of sustainable management of destruction waste corresponds to the strategic priorities of the restoration of Ukraine, the requirements of the legislation of the European Union in the field of waste management and the circular economy, as well as modern methodological approaches to the post-conflict restoration of territories. The work has a practical direction, as its results can be used by state authorities, local self-government bodies and enterprises of the construction industry during the development of regional and sectoral programs for the management of destruction waste.

Analysis of recent research and publications. The issues of construction and destruction waste (CDW) management are actively researched in the world scientific literature at the intersection of environmental, technological and socio-economic aspects.

In review I. Papamichael with co-authors [2] systematized the principles of circular economy in the management of the CDW and emphasized the defining role of the waste management hierarchy enshrined in the EU Waste Framework Directive. C. Zhang and co-authors [3], based on the analysis of the practice of EU countries, showed that the consistent application of the waste management hierarchy makes it possible to significantly increase the level of circularity of the construction sector and outlined the technological barriers of concrete processing.

T. G. Weerakoon with co-authors [4] proposed a multi-criteria decision-making (AHP) technique to select a construction waste management strategy, proving that environmental criteria carry the greatest weight among

economic, technical and social factors. S. Kaewunruen with co-authors [5] explored the possibilities of integrating BIM modeling and digital doubles to plan dismantling and account for material flows, which makes it possible to increase the transparency and cost-effectiveness of recycling processes.

The specifics of the management of destruction waste in the conditions of war in Ukraine are highlighted in the World Bank report on municipal management of destruction waste [8], which identified institutional and financial gaps, including the lack of mechanisms to compensate for the costs of dismantling and removing waste from private households. A study commissioned by the United Nations Development Program quantified the potential of waste processing in Ukraine and identified priority steps for 2026–2028 regarding the development of the secondary raw material market [6; 7]. Technological aspects of concrete debris recycling within the S3RoU (Safe, Sustainable and Swift Reconstruction of Ukraine) project, implemented with the participation of the University of Leeds, are considered in work [11], while examples of public initiatives for separate dismantling and reuse of building materials are given in the Yale Environment 360 material [12]. The conducted analysis shows that modern research mainly focuses on individual technological solutions or economic aspects of waste management. At the same time, the issues of integrating the principles of circular economy, digitalization and institutional management into a single system remain insufficiently developed, which determines the direction of this study.

Highlighting previously unresolved parts of the general problem, to which this article is devoted. Despite the presence of a significant body of research, most of them focus either on individual technological solutions (concrete processing, BIM accounting) or on economic or institutional evaluation separately, without forming a coherent system model that would combine principles, methods and organizational mechanisms into a single structure adapted to the conditions of post-war reconstruction. Approaches to the classification of destruction waste management methods according to their functional purpose within a single system also remain insufficiently developed.

This article is devoted to the elimination of the specified gap by developing a generalized system of principles and methods of sustainable management of destruction waste and substantiating the prospects for its development in the context of the reconstruction of Ukraine.

The novelty. The scientific novelty of the study consists in the development of a complex conceptual model of sustainable management of destruction waste, which combines seven interrelated principles and five groups of methods into a single system covering regulatory, organizational, technological, digital, economic, institutional and environmental components. Unlike the available research, which mainly focuses on certain technological or economic aspects of construction and destruction waste management, the proposed approach ensures their comprehensive coordination within a single concept focused on the implementation of the principles of the circular economy in the process of post-war recovery. The practical significance of the obtained results lies in the formation of a structural model suitable for use during the development of state and regional programs for the management of destruction waste, as well as to support management decision-making regarding the reuse of secondary material resources.

To specify the declared novelty, Table 1 shows the juxtaposition of the proposed approach with the key works analyzed in the previous section.

As can be seen from Table 1, the available studies mostly focus on individual aspects of CDW management, while the proposed model integrates these aspects into a single management decision support system.

Research methodology. The methodological basis of the research is a systematic approach to the management of destruction waste, which involves considering the processes of formation, sorting, processing and reuse of materials as interconnected elements of a single system. The work uses a complex of general scientific and special research methods. The method of system analysis was used to form the structure of the system of sustainable management of destruction waste and to determine the relationships between its regulatory, technological, digital, economic, institutional and environmental components. Benchmarking has been applied to collate traditional linear and circular waste management models. Content analysis of international and national regulatory documents, scientific publications and analytical reports of international organizations was used to determine modern principles and methods of destruction waste management. The generalization and systematization of the results made it possible to form a classification of the principles and methods of sustainable management and to develop a structural model of the system.

To ensure the logical sequence of the research, the methodical procedure was built in the form of six interrelated stages.

At the first stage, an analysis of international scientific publications, regulatory and legal documents and analytical reports of international organizations on the management of construction waste and destruction waste, the principles of the circular economy and the post-war restoration of territories was carried out in order to determine modern trends, problems and best practices.

At the second stage, the principles of sustainable management of destruction waste were systematized in accordance with the concepts of waste management hierarchy, material life cycle assessment, circular economy, digitalization and institutional management.

The third stage provided for the classification of destruction waste management methods according to their functional purpose, with the selection of five groups: mechanical, thermochemical, biological, digital and organizational and economic methods.

Table 1

Comparison of the proposed approach with the available research

Source/approach	Focus	What is missing compared to the proposed model
Papamichael I. et al. [2]	Principles of Circular Economics in CDW Management	Does not integrate technological methods and the digital component into a single decision support system
Zhang C. et al. [3]	Hierarchy of waste management in EU practice	Not adapted to the conditions of large-scale military destruction
Weerakoon T. G. et al. [4]	Multi-criteria decision making (AHP) to choose a waste management strategy	Focus only on the decision-making procedure, without a structural model of the system
Kaewunruen S. et al. [5]	BIM modeling and digital doubles for disassembly planning	Considers only the digital component, without regulatory and institutional components
World Bank [8]	Institutional and financial gaps in the management of destruction waste in Ukraine	Diagnosis of the problem without proposing a holistic conceptual model
Proposed model (this study)	Integration of seven principles, five groups of methods and six functional constituents	It integrates the regulatory, technological, digital, economic, institutional and environmental components into a single management decision support system

Table 2

Principles of the system of sustainable management of destruction waste

Principle	Essence and role in the system
Hierarchies of waste management	Priority of waste prevention, hereinafter – reuse, recycling, recovery and only last landfill (according to the logic of the Waste Framework Directive 2008/98/EC) [2; 3].
Life cycle of materials	Taking into account the impact of building materials on the environment at all stages – from extraction of raw materials to dismantling and re-engagement in circulation.
Circularity	Replacing the linear model «mining – production – waste» with a closed cycle of material circulation, which minimizes the attraction of primary resources [2–4].
Extended responsibility	Assigning responsibility for waste management to all participants in the life cycle of the – developer, contractor, owner, local self-government body.
Proximity and priority of local processing	Placement of sorting and processing facilities as close as possible to waste generation sites to reduce transport costs and emissions.
Digital transparency and traceability	Mandatory digital accounting of material flows (BIM models, registers, «material passports») to control the volume and quality of secondary raw materials [4; 5].
Institutional coordination	Concerted interaction of state authorities, local self-government bodies, business and public initiatives within a single regulatory framework [8; 9].

At the fourth stage, using system analysis, the relationships between the principles, methods and functional components of the management system were determined, which made it possible to form its hierarchical structure.

At the fifth stage, the author's conceptual model of the system of sustainable management of destruction waste was developed, which integrates regulatory, technological, digital, economic, institutional and environmental components into a single system of support for management decisions.

At the final, sixth stage, the proposed conceptual model was compared with modern international approaches presented in the scientific literature and documents of international organizations, which made it possible to assess its conceptual coherence and potential suitability for use in the conditions of the post-war reconstruction of Ukraine.

Presentation of the main material. As stated above, the volumes of accumulated destruction waste already exceed the capabilities of the traditional construction waste management system formed for peacetime conditions. According to estimates by international organizations, up to 70% of this volume could potentially be used as secondary material resources, provided that an effective system of their management is established [6; 7].

The obtained results indicate that the solution to the specified problem cannot be limited to the introduction of individual processing technologies or the improvement of regulatory and legal regulation. Significant volumes of waste, their heterogeneous composition, spatial dispersion of places of formation and the need to ensure environmental safety require a comprehensive systematic approach that combines all stages of destruction waste management within a single functional structure.

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

The work proposes to consider the system of sustainable management of destruction waste as a set of interconnected organizational, technological, informational, economic and environmental processes aimed at maximum preservation of material resources and minimization of negative impact on the environment. Compared to the traditional approach, which is focused mainly on waste disposal, the proposed system is based on the principles of a circular economy and provides for the return of the maximum possible share of materials into economic circulation.

The basis of the developed system is a set of interrelated principles that determine the logic of management decision-making at all stages of destruction waste management – from the assessment of damaged objects to the reuse of secondary raw materials in the reconstruction process. It is substantiated that the effectiveness of the system is determined not by individual principles, but by the level of their integration into a single management mechanism.

To systematize the conceptual foundations of sustainable management of destruction waste, a complex of seven interrelated principles was formed, which are given in the table. 2. Their choice was carried out taking into account the modern requirements of the circular economy, international practice of construction waste management and the peculiarities of the post-war recovery of Ukraine.

After analyzing the proposed principles, it was established that the system-forming role is performed by the principle of the waste management hierarchy, which determines the sequence of priorities during management decision-making. At the same time, the principles of life cycle assessment, circularity, digital transparency, extended responsibility, proximity and institutional coordination ensure the functioning of the system as a single interconnected complex.

It is rational to consider digital transparency not as a separate technological tool, but as an integrating element of the system, which ensures information interaction between all its functional components. This creates prerequisites for controlling material flows, increasing the reliability of accounting for secondary raw materials, and making informed management decisions at the state, regional, and local levels.

The analysis of the given principles shows that they are not isolated elements, but form an interdependent management system. Central to the principle of the waste management hierarchy, while digital transparency provides information support for all other principles. Institutional coordination creates organizational conditions for the practical implementation of the proposed system.

Central to the proposed principles is the principle of the waste management hierarchy, which determines the logic of management decision-making at all stages of the system's functioning (Fig. 1). It is shown that it is the consistent observance of the priority of waste prevention, reuse, processing, material recovery and only in the extreme case of burial that ensures the maximum preservation of the resource potential of destruction waste.

Instead of the traditional linear approach, the proposed system considers destruction waste as a secondary material resource suitable for reuse in the post-war reconstruction process. This approach makes it possible to simultaneously reduce the volume of waste disposal, reduce the consumption of primary raw materials and minimize the negative impact of construction activities on the natural environment.

Methods of managing destruction waste. The implementation of the proposed principles requires the application of an interconnected complex of technological, digital and organizational solutions. The work forms a classification of methods of sustainable management of destruction waste, which unites five functional groups: mechanical, thermochemical, biological, digital and organizational and economic methods (table. 3).

Compared to the existing classifications, which mainly consider processing technologies separately



Fig. 1. The hierarchy of destruction waste management as the basis of the system of sustainable development

Table 3

Classification of methods of handling destruction waste

A group of methods	Examples of methods	Main purpose
Mechanical	concrete crushing, magnetic and air separation, screening, mobile crushing and sorting complexes	obtaining secondary crushed stone, scrap metal, fractionated raw materials
Thermal and chemical	neutralization of chemical residues, heat treatment of dangerous fractions, stabilization of asbestos-containing waste	disposal of dangerous and toxic components
Biological	composting the organic fraction using wood waste as a structural additive; using the organic fraction as a biofuel or substrate	utilization of wooden and organic fractions
Digital	BIM modeling, digital material registers, «material passports», IoT flow monitoring [4; 5]	accounting, dismantling planning, traceability of materials
Organizational and economic	quality standards for secondary materials, «green» public procurement, market incentives, permitting procedures [8; 9]	formation of the market of secondary raw materials, stimulation of processing

from management mechanisms, the proposed approach integrates all methods into a single process of material flow management. This ensures the coordinated functioning of technological operations, information support and economic incentives at all stages of the life cycle of materials.

The conducted analysis showed that each group of methods performs an independent function, but the greatest efficiency of the system is achieved only with their complex application.

It was found that mechanical methods ensure the preparation of secondary mineral raw materials for further use in construction, thermochemical – safe management of dangerous components, biological – disposal of organic fractions, digital – information support of material flows, and organizational and economic – creation of regulatory and economic conditions of system functioning.

This classification allows methods to be considered not as isolated technological operations, but as complementary elements of a single management system. This approach provides the possibility of comprehensive planning of the processes of sorting, transportation, processing, reuse and environmental control of destruction waste.

A feature of the proposed system is the integration of digital methods with technological and organizational and economic mechanisms. It is advisable to use digital tools as a basis for informational support for management decision-making, which ensures the traceability of material flows, control of compliance with regulatory requirements and the formation of a reliable database on the generation, processing and reuse of destruction waste.

The obtained results show that the proposed classification forms the conceptual basis for building an integrated system of sustainable management of destruction waste and substantiates the need to develop the author's conceptual model of its functioning (Fig. 2).

The proposed conceptual model reflects the interrelationship of the key elements of the system of sustainable management of destruction waste and the sequence of the main processes – from the generation of waste, its inventory, sorting and processing to the reuse of secondary materials in the process of post-war reconstruction. The model integrates regulatory, organizational, technological, environmental, economic and digital components, providing a comprehensive approach to the implementation of the principles of the circular economy.

Unlike traditional approaches, which focus mainly on individual technological operations, the proposed model combines all stages of material flow management into a single integrated system. It covers the assessment of damage to objects, inventory of materials, their classification, sorting, selection of optimal processing technologies, production of secondary raw materials and their further use during infrastructure reconstruction.

The efficiency of the system's functioning is ensured by the interaction of technological processes with digital management tools (BIM, electronic registers, monitoring systems), regulatory and legal regulation, environmental control and economic mechanisms for stimulating the reuse of materials. Such integration creates conditions for continuous management of material flows, increasing resource efficiency and minimizing resource losses at all stages of the life cycle.

The proposed model demonstrates that the management of destruction waste is not limited to its recycling. The final result of the functioning of the system is the return of secondary materials to economic circulation, which contributes to the reduction of the use of primary raw materials, the reduction of waste disposal volumes, the reduction of the ecological burden and ensures the implementation of the principles of the circular economy in the process of post-war reconstruction.

A feature of the developed model is the integration of environmental control and digital support processes at all stages of management, which creates conditions for making timely and well-founded management decisions.

The next result of the research was the development of the author's structural model of the system of sustain-

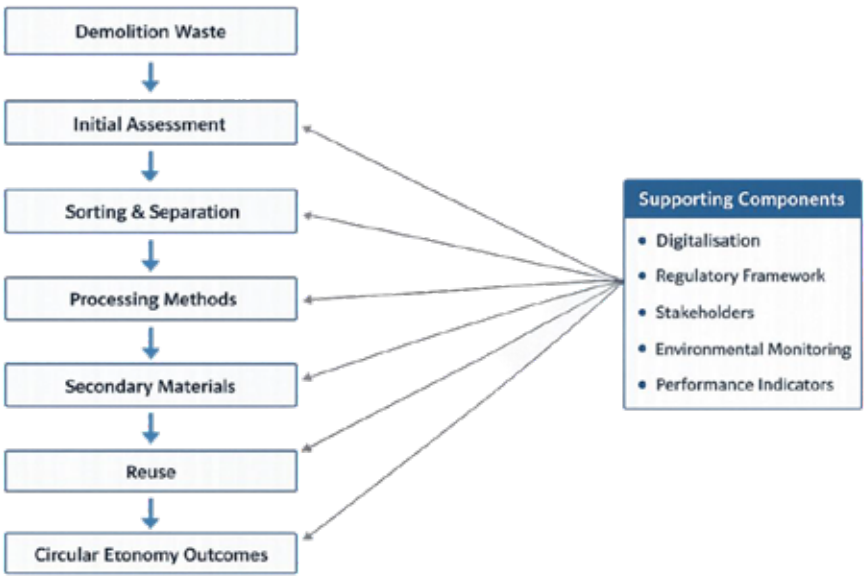


Fig. 2 Conceptual framework for sustainable demolition waste management based on circular economy principles (developed by the authors)

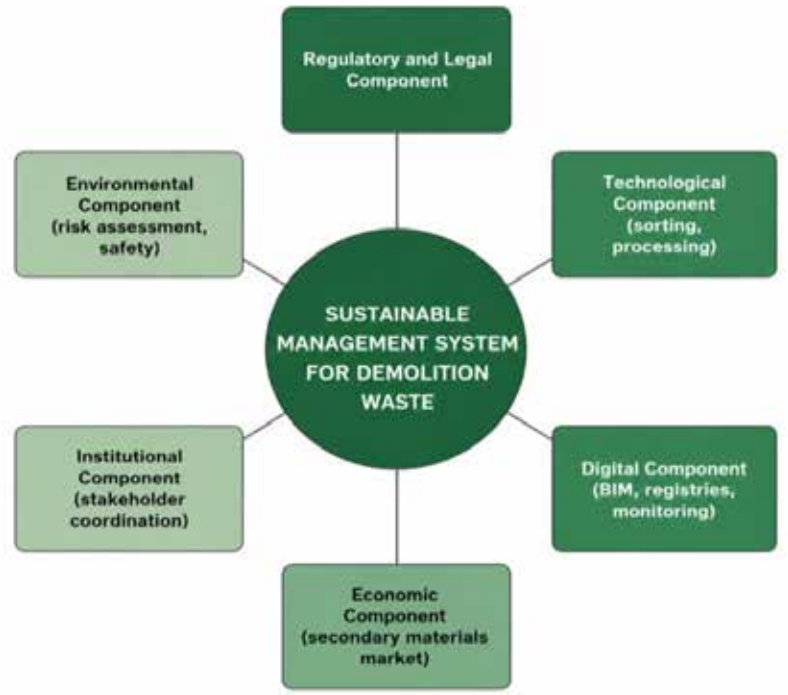


Fig. 3 Structural model of the system of sustainable management of destruction waste (developed by the author).

able management of destruction waste, which reflects the relationships between the main functional components of the system (Fig. 3).

Unlike existing conceptual approaches, the proposed model combines regulatory, technological, digital, economic, institutional and environmental components into a single management decision support system.

It is worth using the digital component as an integrating element of the system, which ensures informational interaction between all participants in the destruction waste management process. This makes it possible to carry out operational accounting of material flows, monitor the fulfillment of regulatory requirements, evaluate the efficiency of processing and ensure the transparency of management decision-making processes.

Each functional component of the system performs certain tasks, but only their complex interaction ensures the achievement of sustainable management goals. The

regulatory and legal component forms the regulatory environment, the technological component ensures sorting and processing processes, the economic component creates incentives for the development of the secondary raw material market, the institutional component coordinates the interaction of all interested parties, and the environmental component ensures monitoring of the impact of the system on the environment.

It is argued that it is the digital integration of all functional components that allows to ensure their coordinated work, increase the efficiency of management decision-making and improve the efficiency of using the resource potential of destruction waste.

On the basis of the conducted systematic analysis, it was established that the proposed model can be used as a methodological basis for the formation of state and regional programs for the management of destruction waste. Its application ensures the integration of the principles of circular economy, modern processing technologies, digital management tools and economic mechanisms for stimulating the reuse of materials within a single system.

The proposed concept is consistent with modern international trends in the development of construction waste management systems, however, unlike existing research, it integrates regulatory, technological, digital, economic and institutional mechanisms into a single management decision support system.

It is advisable to use a digital control loop that ensures continuous exchange of information between all participants in the – process bodies of state power, local self-government, waste management operators, project organizations and enterprises of the construction industry. This makes it possible to increase the transparency of material flows, simplify the control of the fulfillment of regulatory requirements and ensure the support of management decisions in real time.

A feature of the proposed system is the integration of the principles of the circular economy with organizational and economic mechanisms, which ensures not only the technological processing of waste, but also the formation of a sustainable market of secondary construction raw materials. This approach creates the prerequisites for scaling the system at the regional and national levels.

The practical implementation of the proposed system is already partially taking place in Ukraine. Thus, the Cabinet of Ministers of Ukraine, by a resolution dated February 5, 2026, approved the procedure for the implementation of target indicators for the preparation of construction waste for reuse, processing and other material recovery, which establishes uniform requirements for enterprises – generators of such waste, regardless of the form of ownership [9]. As part of international technical assistance, the S3RoU project is being implemented with the participation of the University of Leeds, aimed at developing technologies for processing concrete fragments into low-carbon building materials suitable for reuse in reconstruction facilities [11]. In parallel, a number of community initiatives are developing, including mobile dismantling and sorting facilities implemented by voluntary organizations in de-occupied areas and combining manual sorting with training of local residents [12].

The digital component of the system is becoming increasingly important thanks to the development of BIM modeling and digital twin technologies, which make it possible to model the dismantling process in advance, forecast the volume and quality of secondary raw materials, as well as evaluate the economic effect of various waste management scenarios [4; 5]. The integration of such tools into the destruction waste management system increases the transparency of material flows and facilitates the control of the implementation of established recycling targets.

For a generalized comparison of linear (preferred disposal) and circular (system) models of destruction waste management, Table 4 shows the main differences according to key indicators.

As the comparison shows, the transition from a linear model to a system circular model does not require fundamentally new technologies – the vast majority of the necessary methods have already been tested in global practice [2–5]. The main challenge remains the coordinated integration of regulatory, technological, digital,

Table 4

Comparative characteristics of linear and circular models of destruction waste management

Indicator	Linear model (preferred burial)	Circular (system) model
Volume of destruction waste as of September 2025.	17.2 million tonnes formed; 11.7 million tonnes need to be cleared [6; 7]	same, but seen as a resource base
Reuse potential	not used or used fragmentarily	up to 70 % (≈ 8.2 million t) are recyclable and reusable [6; 7]
Regulatory framework	no recycling targets	target indicators of preparation for reuse and processing, established by the resolution of the CMU dated February 5, 2026. [9]
Technological base	isolated examples of mobile recycling	network of mobile and fixed sorting and processing complexes [10]
Digital support	practically absent	BIM modeling, digital registers and tangible passports [4; 5]

Table 5

Key performance indicators for evaluating the proposed sustainable demolition waste management system

Indicator	Unit	Target	Data source
Recycling rate	%	>70	Regional waste management reports
Landfilled waste	%	<20	Municipal waste registry
CO_2 emissions	kg CO_2/t	Decrease	LCA calculations
Secondary materials	t	Increase	Material flow database

Table 6

Illustrative application of the proposed framework for reconstruction of a damaged road bridge

Stage	Main actions	Expected result
1. Damage assessment	Bridge inspection, digital fixation	Determination of waste volumes
2. Inventory	Identification of materials	Database formation
3. Sorting	Separation of concrete, metal, asphalt concrete	Preparation for processing
4. Recycling	Crushing of concrete, melting of metal	Secondary raw materials
5. Reuse	Use of materials during reconstruction	Reducing the use of natural resources
6. Monitoring	KPI assessment	System performance control

economic and institutional components within a single national system, which is the main task of the research presented in this article.

Evaluating the effectiveness of the functioning of the proposed system requires the use of quantitative indicators that reflect the degree of achievement of the goals of the circular economy and sustainable management of destruction waste. For this purpose, a system of key performance indicators is proposed, given in the table. 5.

The proposed system of indicators provides a comprehensive assessment of the effectiveness of sustainable management of destruction waste. The use of quantitative indicators makes it possible to monitor the effectiveness of the system's functioning, assess progress in achieving the goals of the circular economy, and support management decision-making at the state, regional, and local levels.

Demonstration of the application of the conceptual model. To demonstrate the capabilities of the proposed conceptual model, a conditional example of the restoration of a damaged road bridge after its destruction as a result of hostilities was considered. The example is not the result of a real project, but is used to illustrate the sequence of functioning of the developed system.

At the initial stage, the degree of damage to structures is assessed and material resources are inventoried. Debris is classified by types of materials (concrete, reinforcing steel, asphalt concrete, wood and other materials), after which it is sorted in accordance with the requirements of safe management and the possibilities of further processing.

Concrete waste after crushing has significant potential for use as a secondary aggregate in the installation of road surface foundations and the preparation of construction sites. Metal elements are sent for remelting, and suitable asphalt concrete can be reused during highway repairs. At the same time, the widespread introduction of secondary materials in road and civil construction requires further development of the regulatory and technical framework, harmonization of national standards with European requirements, and introduction of procedures for assessing the quality and safety of such materials. Materials that cannot be reused or recycled are transferred to controlled disposal in accordance with current environmental requirements.

At the same time, digital tools (BIM models, geoinformation systems and electronic registers of materials) ensure the traceability of material flows, documentation of processing processes and evaluation of the effectiveness of decisions made. The effectiveness of the system's functioning is evaluated according to the proposed key performance indicators (table. 5).

The conditional example demonstrates that the application of the proposed conceptual model ensures the return of a significant part of material resources to the production cycle, reduces the volume of waste disposal, reduces the consumption of primary raw materials, and contributes to the implementation of the principles of the circular economy during the post-war restoration of transport infrastructure.

The application of these indicators makes it possible to evaluate the effectiveness of the implementation of the principles of the circular economy, determine directions for improving the management system and monitor the achievement of the strategic goals of the post-war recovery.

The example proposed in Fig. 3 demonstrates the possibility of practical application of the developed conceptual model during the restoration of a damaged road bridge. The sequence of stages covers damage assessment, inventory of material resources, selective dismantling, sorting, waste processing, production of

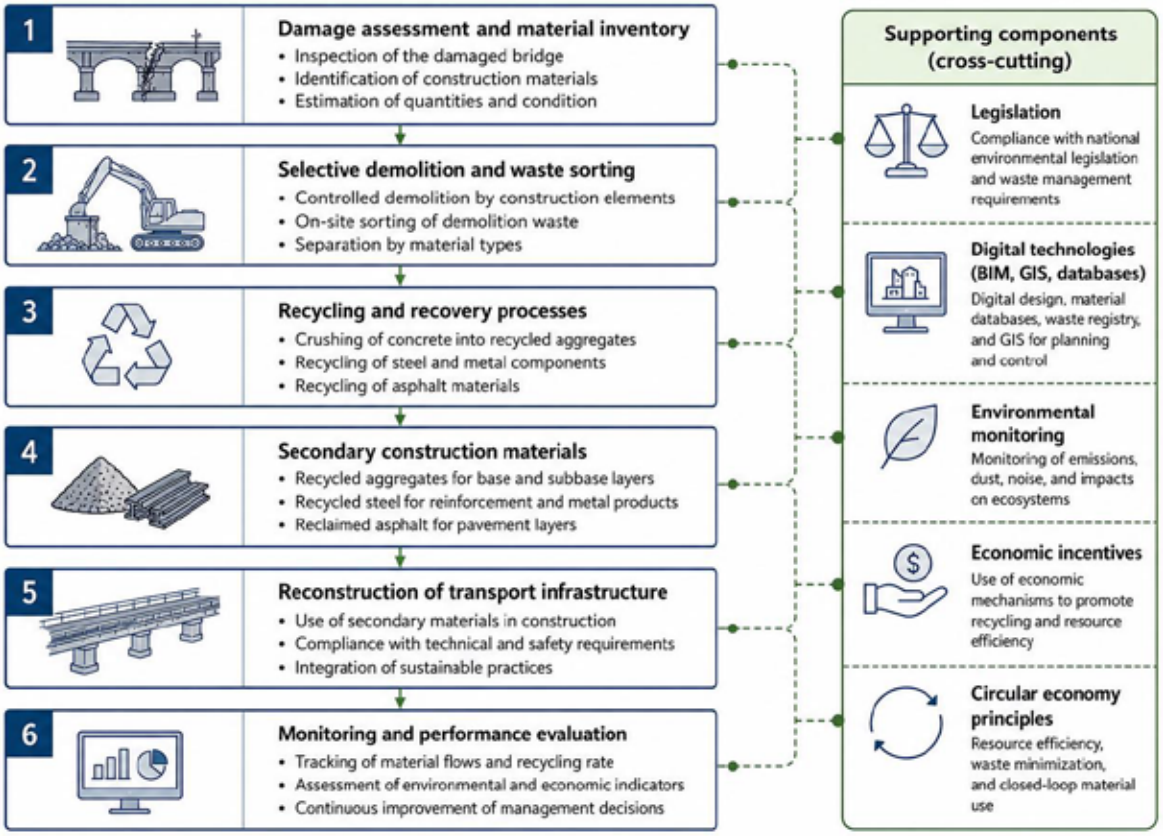


Fig. 4 Illustrative application of the proposed conceptual framework for sustainable demolition waste management during the reconstruction of a damaged road bridge (developed by the author)

secondary raw materials and their reuse in the process of reconstruction of transport infrastructure. This approach ensures the implementation of the principles of the circular economy throughout the life cycle of material flows.

An important component of the proposed model is the integration of digital technologies, in particular BIM, Geographic Information Systems (GIS), electronic waste registers and digital material passports. Their use ensures the traceability of material flows, increases the transparency of management processes, simplifies the monitoring of key performance indicators and supports the adoption of well-founded management decisions during the implementation of post-war recovery projects.

Although the given example is illustrative in nature, it demonstrates the logic of the functioning of the proposed system and confirms the possibility of its practical application during the restoration of transport infrastructure facilities. It is advisable to direct further research to the approbation of the model on real infrastructure facilities using actual data on the generation, processing and reuse of destruction waste.

Main conclusions. The work developed a conceptual model of sustainable management of destruction waste, based on the principles of a circular economy and covering all the main stages of management with material flows – from damage assessment and waste sorting to the production of secondary raw materials and their reuse in the process of post-war reconstruction.

The proposed model integrates the regulatory, organizational, technological, environmental, economic and digital components of management, which provides a comprehensive approach to the functioning of the system and creates prerequisites for increasing resource efficiency and reducing the negative impact on the environment.

The scientific novelty of the study consists in the development of an integrated conceptual model of sustainable management of destruction waste and a system of key performance indicators that can be used to evaluate the effectiveness of the implementation of the principles of the circular economy in the processes of post-war restoration of transport infrastructure.

The practical significance of the work lies in the possibility of using the proposed model by state authorities, local self-government bodies, project organizations and enterprises of the construction industry during the planning, monitoring and implementation of measures for sustainable management of destruction waste.

It is advisable to direct further research to the approbation of the proposed model at real transport infrastructure facilities, the development of a system for quantitative assessment of the effectiveness of its functioning, and the integration of digital technologies (BIM, GIS,

digital material passports) into the processes of destruction waste management.

Research limitations. The study is conceptual in nature and is based on systematic analysis, generalization of modern scientific publications, international regulatory documents and analytical reports. The proposed system did not undergo large-scale practical testing in the conditions of real post-war reconstruction, and its effectiveness needs further quantitative assessment. In addition, the dynamic nature of military destruction and the constant increase in the volume of destruction waste may require periodic clarification of the structure of the system and the target indicators of its functioning.

Management implications. The developed conceptual model can be used by state authorities, local self-government bodies, construction industry enterprises and waste management operators during the development of state and regional destruction waste management strategies. Its application will contribute to the planning of the development of sorting and processing infrastructure, the implementation of digital systems for the traceability of material flows, the formation of quality standards for secondary raw materials and the integration of the principles of the circular economy into the processes of post-war reconstruction in accordance with the requirements of the European Union.

Prospects for using the research results. It is advisable to direct further research to the practical approbation of the proposed system in certain regions of Ukraine and the evaluation of its effectiveness using quantitative indicators. Prospective directions are the development of a system of performance indicators, management decision support models, the application of life cycle assessment (LCA) methods, material flow analysis (MFA), as well as the use of digital doubles and artificial intelligence technologies to predict the generation, sorting and reuse of destruction waste. Such research will contribute to the formation of scientifically based mechanisms for the implementation of the principles of the circular economy in the process of long-term recovery of Ukraine.

References

1. Ukraine Third Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA3): February 2022 – December 2023. Washington, DC ; Brussels ; New York : World Bank, European Commission, United Nations, 2024. URL: https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2024/02/15/updated-ukraine-recovery-and-reconstruction-needs-assessment-released (дата звернення: 20.07.2026).
2. Papamichael I., Voukkali I., Loizia P., Zorpas A. A. Construction and demolition waste framework of circular economy: a mini review. Waste Management & Research. 2023. URL: https://doi.org/10.1177/0734242X231190804
3. Zhang C., Hu M., Di Maio F., Sprecher B., Yang X., Tukker A. An overview of the waste hierarchy framework for analyzing the circularity in construction and demolition waste management in Europe. Science of the Total Environment. 2022. Vol. 803. Art. 149892. URL: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149892
4. Weerakoon T. G., Zvirgzdins J., Lapuke S., Wimalasena S., Drukis P. Integrating Circular Economy (CE) Principles into Construction Waste Management (CWM) Through Multiple Criteria Decision-Making (MCDM). Sustainability. 2025. Vol. 17, No. 17. Art. 7770. URL: https://doi.org/10.3390/su17177770
5. Kaewunruen S., Lin Y.-H., Guo Y. BIM-driven digital twin for demolition waste management of existing residential buildings. Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Art. 28989. URL: https://doi.org/10.1038/s41598-025-13938-9
6. Implementation of the Debris Recycling and Reuse System in Ukraine: Summary Report on the Findings and Recommendations of the Feasibility Study. Kyiv : United Nations Development Programme, 2026. URL: https://www.undp.org/ukraine/publications/study-debris-recycling-and-reuse-in-ukraine (дата звернення: 20.07.2026).
7. Ukraine could recover up to 8.2 million tonnes of secondary raw materials from war-generated debris, UNDP study reveals : press release, 9 June 2026. *United Nations Development Programme*. URL: https://www.undp.org/ukraine/press-releases/ukraine-could-recover-82-million-tonnes-secondary-raw-materials-war-generated-debris-undp-study-reveals (дата звернення: 10.07.2026).
8. Recommendations Toward a Policy Note: Municipal Debris Management in Ukraine. Washington, DC : World Bank, January 2025. URL: https://documents1.worldbank.org/curated/en/099053025113533353/pdf/P180174-29bcff8a-ddba-4d1c-9692-ae99e929a796.pdf (дата звернення: 20.07.2026).
9. Про затвердження Порядку реалізації цільових показників підготовки будівельних відходів та відходів руйнації до повторного використання, переробки та іншого матеріального відновлення : Постанова Кабінету Міністрів України від 05.02.2026. За повідомленням: *Ukraine approves rules to boost recycling of construction and demolition waste*. *Global Cement*. 2026. URL: https://www.cemnet.com/News/story/180781/ukraine-approves-rules-to-boost-recycling-of-construction-and-demolition-waste.html (дата звернення: 20.07.2026).
10. Кабінет Міністрів України. План заходів з реалізації Національного плану управління відходами на 2025–2033 роки. Київ, 2025. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1353-2024-%D1%80#Text (дата звернення: 20.07.2026).
11. Rubble recycling could be key to rebuilding Ukraine [S3RoU project, University of Leeds]. *Build in Digital*. 2025. URL: https://buildindigital.com/rubble-recycling-could-be-key-to-rebuilding-ukraine/ (дата звернення: 20.07.2026).
12. From Ruins to Reuse: How Ukrainians Are Repurposing War Waste. *Yale Environment 360*. 2025. URL: https://e360.yale.edu/features/ukraine-war-debris-recycling (дата звернення: 20.07.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 24.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

УДК 504.06:628.4(477.51)
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.55

СТРАТЕГІЧНЕ ПЛАНУВАННЯ УПРАВЛІННЯ ПОБУТОВИМИ ВІДХОДАМИ: РЕГІОНАЛЬНИЙ АСПЕКТ ТА МЕХАНІЗМИ ВПРОВАДЖЕННЯ В ЧЕРНІГІВСЬКІЙ ОБЛАСТІ

Цибуля С.Д. (orcid.org/0000-0002-7843-6061),
Кулько Т.В. (orcid.org/0000-0003-2734-5300),
Костенко І.А., (orcid.org/0000-0003-1195-516)
Корнієнко І.В. (orcid.org/0000-0001-9105-0780)
Національний університет «Чернігівська політехніка»
вул. Шевченка, 95, 14035, м. Чернігів
s.tsybulia@stu.cn.ua, gortv@stu.cn.ua, atdrj@stu.cn.ua, i.kornienko@stu.cn.ua

Проблема управління побутовими відходами в Україні набула критичного характеру через використання застарілої інфраструктури та руйнівні наслідки воєнних дій. Це вимагає негайного переходу до сучасних моделей управління відходами на засадах затвердженої п'ятиступеневої ієрархії та циркулярної економіки. Дослідження спрямоване на аналіз стратегічного планування просторової моделі системи управління побутовими відходами на регіональному рівні та розробку дієвих механізмів її впровадження в Чернігівській області. Для досягнення поставленої мети застосовано комплексний підхід, що включає просторове моделювання для кластеризації територій та системний аналіз для оцінки об'єктів інфраструктури з оброблення побутових відходів. Встановлено, що наявна система генерує значні екологічні ризики через наявність понад 1000 місць видалення відходів (зокрема понад 400 несанкціонованих звалищ), які не відповідають вимогам екологічної безпеки. Запропонована стратегія базується на просторовому кластерному підході. Вона передбачає розподіл області на чотири основні функціональні зони із виокремленням додаткового субкластера. Обґрунтовано потребу концентрації потоків відходів навколо п'яти нових регіональних полігонів. Також передбачено будівництво чотирнадцяти станцій сортування та шести станцій перевантаження відходів для оптимізації логістики в умовах низької щільності населення. Доведено необхідність інтеграції локальних постів контролю звалищних газів на нових регіональних полігонах до обласної системи моніторингу атмосферного повітря. Це дозволить спільно аналізувати емісію звалищних газів та викидів від наявних стаціонарних джерел забруднення, зокрема об'єктів теплоенергетики, тощо. Запропоновано організаційно-фінансові механізми реалізації стратегії: впровадження розширеної відповідальності виробника, залучення міжнародних грантів та застосування принципу «забруднювач платить». Одержані результати формують практичну базу для місцевого самоврядування щодо реалізації регіонального плану управління відходами та забезпечення екологічної стійкості територій під час відбудови. *Ключові слова:* побутові відходи, інфраструктура оброблення відходів, циркулярна економіка, просторове моделювання, логістична оптимізація, екологічна безпека.

Strategic planning of household waste management: regional aspect and implementation mechanisms in the Chernihiv region. Tsybulia S., Kulko T., Kostenko I., Korniienko I.

Household waste management in Ukraine has become a critical issue due to outdated infrastructure and the devastating consequences of military actions. This necessitates an immediate transition to modern waste management models based on the approved five-step waste hierarchy and circular economy principles. This study aims to analyse the strategic planning of a spatial model for the regional household waste management system and to develop effective mechanisms for its implementation in the Chernihiv region. To achieve this, a comprehensive approach was applied, incorporating spatial modelling for territorial clustering and system analysis to evaluate household waste treatment infrastructure. The findings establish that the existing system generates significant environmental risks due to the presence of over 1,000 waste disposal sites (including more than 400 unauthorized dumps) that fail to meet environmental safety requirements. The proposed strategy relies on a spatial cluster approach. It involves dividing the region into four primary functional zones, alongside the allocation of an additional subcluster. The necessity of concentrating waste flows around five new regional landfills is substantiated. Furthermore, the construction of fourteen sorting stations and six waste transfer stations is proposed to optimize logistics in areas with low population density. The study demonstrates the necessity of integrating local landfill gas monitoring posts at the new regional landfills into the regional air quality monitoring system. This integration will enable the joint analysis of landfill gas emissions and those from existing stationary pollution sources, particularly thermal power plants, among others. Organizational and financial mechanisms for strategy implementation are proposed, including the introduction of extended producer responsibility, the attraction of international grants, and the application of the "polluter pays" principle. The obtained results provide a practical foundation for local self-government bodies to implement the regional waste management plan and ensure the environmental sustainability of territories during post-war reconstruction. *Key words:* household waste, waste treatment infrastructure, circular economy, spatial modelling, logistical optimization, environmental safety.

© Цибуля С.Д., Кулько Т.В., Костенко І.А., Корнієнко І.В., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. Перехід глобальної економіки до принципів сталого розвитку та циркулярної економіки вимагає докорінного перегляду підходів до використання природних ресурсів і мінімізації негативного впливу антропогенної діяльності на довкілля [1]. Сучасна парадигма державного управління зумовлює необхідність беззастережної відмови від традиційної лінійної моделі на користь європейської п'ятиступеневої ієрархії управління відходами [2].

Актуальність дослідження. Для України імплементація вказаних підходів стала безальтернативним шляхом, зумовленим євроінтеграційними зобов'язаннями та глибокою внутрішньою екологічною кризою [3]. Особливої гостроти ця проблематика набуває на регіональному рівні, де глобальні стратегії повинні трансформуватися в конкретні інфраструктурні проєкти. Чернігівська область виступає репрезентативним полігоном для дослідження. Маючи значний аграрний потенціал та велику площу, вона акумулює весь спектр викликів у сфері екологічної безпеки, які значно посилилися внаслідок воєнної агресії [4].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Затвердження Регіонального плану управління відходами у Чернігівській області до 2033 року [5] стало ключовим кроком для запровадження кластерного підходу та розбудови нової інфраструктури оброблення відходів. Адаптація цих процесів до європейських норм вимагає від місцевого самоврядування нагальних дій [6], що робить дослідження механізмів їх впровадження на базовому рівні критично необхідним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика циркулярної економіки та вдосконалення систем управління відходами перебуває в центрі уваги багатьох інституцій та науковців. Глобальні перспективи циркулярної економіки розкрито у звітах міжнародних організацій [7], а європейський контекст проаналізовано у відповідних інституційних документах [8]. Вагомий внесок у розвиток методології регіонального планування зробили дослідження вітчизняних науковців, у яких обґрунтовано доцільність формування кластерних моделей управління відходами як інструменту досягнення показників відновлення та безпечного видалення відходів [9]. Питання комплексного екологічного моніторингу висвітлено у дослідженнях [10].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Водночас, незважаючи на наявні дослідження процесів модернізації систем управління відходами [11], залишаються недостатньо вивченими питання і специфіка формування дієвих механізмів реалізації регіональних планів управління відходами на територіях, що постраждали від бойових дій.

Дослідження виявляють дисонанс між амбітними європейськими цілями [12] та реальними пріоритетами базового рівня. У той час як європейські директиви фокусуються на глибокому відновленні та зменшенні утворення пластику, для територіальних громад Чернігівщини, як свідчить аналіз виконання місцевих програм, першочерговим завданням залишається ліквідація несанкціонованих звалищ, вирішення проблеми безхазяйних токсичних агрохімікатів [13], приведення операцій з управління небезпечними відходами у відповідність до норм ЄС [14] та забезпечення покриття сільського населення послугою з управління побутовими відходами. З огляду на це, метою дослідження є теоретичне обґрунтування та розробка практичних механізмів стратегічного планування управління побутовими відходами на регіональному рівні (на прикладі Чернігівської області) з урахуванням європейських принципів, просторового розвитку та наслідків воєнних дій.

Новизна. Отримані результати підтверджують глобальну тенденцію до укрупнення інфраструктури, проте виявляють суттєву регіональну специфіку, зумовлену просторовими та безпековими викликами [15]. На відміну від західних регіонів України, де кластеризація спирається на економію масштабу та рівномірне розселення [16], специфіка Чернігівщини вимагає включення до сценарного моделювання фактора «безпекової логістики». Наявність замінованих територій (понад 20 тис. га), зруйнованих мостів та загроза обстрілів у прикордонних громадах робить неможливим застосування класичних європейських моделей оптимізації маршрутів. Тому запропонована модель відрізняється підвищеною роллю проміжних станцій перевантаження відходів як елементів забезпечення стійкості системи в кризових умовах.

Особливої уваги заслуговує запропонований синергетичний підхід до екологічного моніторингу атмосферного повітря. Інтеграція даних викидів звалищних газів від полігонів та діючих стаціонарних джерел у єдину хмарну базу дозволить застосовувати математичні моделі розсіювання домішок в атмосфері (алгоритми AERMOD або CALPUFF) для побудови карти накладання емісійних шлейфів. При несприятливих метеорологічних умовах емісія неметанових летких органічних сполук (НМЛОС) від полігону та оксидів азоту (NO_x) від об'єктів теплоенергетики будуть аналізуватися як єдиний кумулятивний фактор ризику для здоров'я населення прилеглих територіальних громад.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічною основою дослідження є поєднання системного, сценарного та цільового підходів до проєктування екологічно безпечної та економічно ефективної регіональної інфраструктури на принципах циркулярної економіки та п'ятиступеневої ієрархії управління відходами, закріпленої у профільному законодавстві щодо управління відходами [17].

Об'єктом дослідження є процес стратегічного планування регіональної системи управління побутовими відходами в умовах сучасних екологічних та безпекових викликів. Предметом дослідження є організаційно-економічні, просторово-логістичні та управлінські механізми впровадження кластерної моделі управління відходами в Чернігівській області відповідно до цільових орієнтирів екологічної політики.

Емпіричну основу роботи складають офіційні статистичні та аналітичні дані Департаменту екології та природних ресурсів Чернігівської обласної державної адміністрації (за період 2020–2024 рр.), а також фактичні та прогнозні показники, зафіксовані у Регіональному плані управління відходами у Чернігівській області до 2033 року, який розроблено на виконання оновленого Національного плану управління відходами [18]. До аналізу залучено методологічні рекомендації міжнародних організацій [7, 12, 19].

Для розв'язання поставлених завдань застосовано комплекс методів: метод аналітичного узагальнення та порівняльного аналізу; структурно-функціональний аналіз; методи статистичного та морфологічного аналізу; просторово-логістичний аналіз та метод сценарного моделювання з використанням геоінформаційного програмного забезпечення QGIS.

Відповідно до Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року [20], базовим підходом визначено кластерний підхід. Формування територіальних меж кластерів здійснювалося на основі Методичних рекомендацій [21] за двома групами критеріїв: основними (демографічне охоплення, можливості розміщення інфраструктури, мінімізація логістичних витрат) та додатковими (поточна адміністративна структура, локальні геоекологічні обмеження). У процесі моделювання сценаріїв як просторове обмеження було враховано також умови чинного Меморандуму про партнерство (2023 р.) між Славутицькою міською територіальною громадою (Київська область) та Любецькою, Михайло-Коцюбинською і Гончарівською селищними громадами (Чернігівська область). Відповідно до нього, місцем видалення відходів (МВВ) для зазначених чотирьох громад визначено наявний паспортизований полігон м. Славутич. Ця територіальна прив'язка використовувалася в геоінформаційній моделі як базовий вузол для конфігурації окремого субкластера.

Виклад основного матеріалу. Система управління відходами в Чернігівській області функціонує в умовах критичного інфраструктурного дефіциту, зокрема, вичерпано ресурс наявних МВВ. Динаміка утворення відходів у регіоні має мінливий характер: після різкого спаду у 2022 році (до 245,8 тис. т) через зупинку промисловості та міграцію населення, у 2024 році зафіксовано зростання загального обсягу утворення відходів до 477,2 тис. т (див. табл. 1).

Стрімке зростання обсягів утворення відходів у 2024 році порівняно з кризовим 2022 роком зумовлене частковим поверненням населення до деокупованих територіальних громад та відновленням роботи низки промислових і аграрних підприємств регіону. З огляду на сталі тенденції демографічного та економічного відновлення, у перспективі прогнозується подальше зростання обсягів утворення побутових відходів до 362,35 тис. т на 2033 рік.

Частка побутових відходів у 2024 році становила 113,9 тис. т (близько 24% від загального обсягу). Аналіз морфологічного складу свідчить про значний ресурсний потенціал: харчові відходи становлять 20,3%, скло – 19,3%, полімери – 11,5%, папір та картон – 6,4%, текстиль – 3,8%, чорні та кольорові метали – 1,9%, деревина – 1,2%. Проте рівень відновлення залишається критично низьким (у 2024 році – 0,32%). Основним способом управління побутовими відходами залишається операція з видалення шляхом захоронення на діючих МВВ Чернігівської області, загальна площа яких перевищує 600 га.

Для розв'язання цієї проблеми розроблено просторово-логістичну модель оптимізації системи управління відходами. Результати моделювання довели, що збереження існуючої адміністративно-територіальної фрагментації (коли кожна громада самостійно управляє відходами) є нежиттєздатною моделлю.

Під час геоінформаційного моделювання було здійснено первинний поділ області на чотири макрокластери з такими параметрами демографічного та інфраструктурного навантаження: «Західний» (охоплення 418,5 тис. осіб, потенційний обсяг утворення побутових відходів – 173,36 тис. т/рік), «Східний» (132,5 тис. осіб, 54,64 тис. т/рік), «Центральний» (192,6 тис. осіб, 79,40 тис. т/рік) та «Південний»

Таблиця 1

Динаміка обсягів утворення відходів у Чернігівській області за 2020–2024 роки, тис. т

Показники утворення відходів	Рік				
	2020	2021	2022	2023	2024
Загальний обсяг утворення відходів	498,4	456,2	245,8	306,7	477,2
Відходи від економічної діяльності підприємств	325,2	341,9	148,7	201,4	363,3
Побутові відходи	173,2	114,2	97,2	105,3	113,9
Частка побутових відходів, %	34,7	25,0	39,5	34,3	23,9

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

(133,3 тис. осіб, 54,95 тис. т/рік). На базі цього макроподілу розроблено оптимальний сценарій територіальної організації, який передбачає концентрацію потоків відходів навколо п'яти нових регіональних полігонів, розташованих у містах Чернігів, Мена, Ніжин, Прилуки та Славутич (рис. 1). Впровадження цієї моделі та заходів зі зменшення обсягів захоронення дозволить радикально скоротити видалення побутових відходів: очікується, що обсяги захоронення знизяться до 60,6 тис. т/рік для «Західного» кластера, 27,7 тис. т/рік – для «Центрального», 19,2 тис. т/рік – для «Південного» та 19,1 тис. т/рік – для «Східного».

Загалом, враховуючи низьку щільність населення регіону (менше 30 осіб/км²) та великі відстані між населеними пунктами, безальтернативним рішенням визначено розбудову дворівневої логістичної мережі. Вона включає будівництво 14 станцій сортування та 6 станцій перевантаження відходів.

Ефективність функціонування станцій сортування безпосередньо залежить від запровадження системи роздільного збирання побутових відходів на базовому рівні, що є основою реалізації циркулярних моделей у громадах [22]. Для територіальних громад області запропоновано поетапний перехід: від впровадження стартової двоконтейнерної системи (поділ на «суху» ресурсоцінну та змішану залишкову фракції) у сільській місцевості та селищах до розгортання повноцінної багатоконтейнерної моделі (з окремим виділенням скла, паперу, пластику та біовідходів) у межах великих міських центрів кластерів.

Економічна збалансованість такої моделі за умови гібридного фінансування доведена через порівняльний аналіз витрат на безпосереднє перевезення та перевезення консолідованих партій відходів. Дослідження поточного стану віддалених громад яскраво демонструє критичну частку логістики у структурі тарифів. Зокрема, на прикладі Корюківської територіальної громади встановлено, що із загальної вартості послуг з управління побутовими відходами (відповідно до актуальних тарифів, що становлять 164,32 грн/м³) витрати виключно на операції зі збирання та перевезення становлять 116,64 грн/м³, тобто сягають 71,0%. За умови збереження практики безпосереднього перевезення спеціалізованими транспортними засобами від населених пунктів громади до нового регіонального полігону (м. Мена), відстань до якого перевищує 30 км, цей логістичний складник зростатиме пропорційно пробігу. Ситуація ускладнюється тим, що зношеність

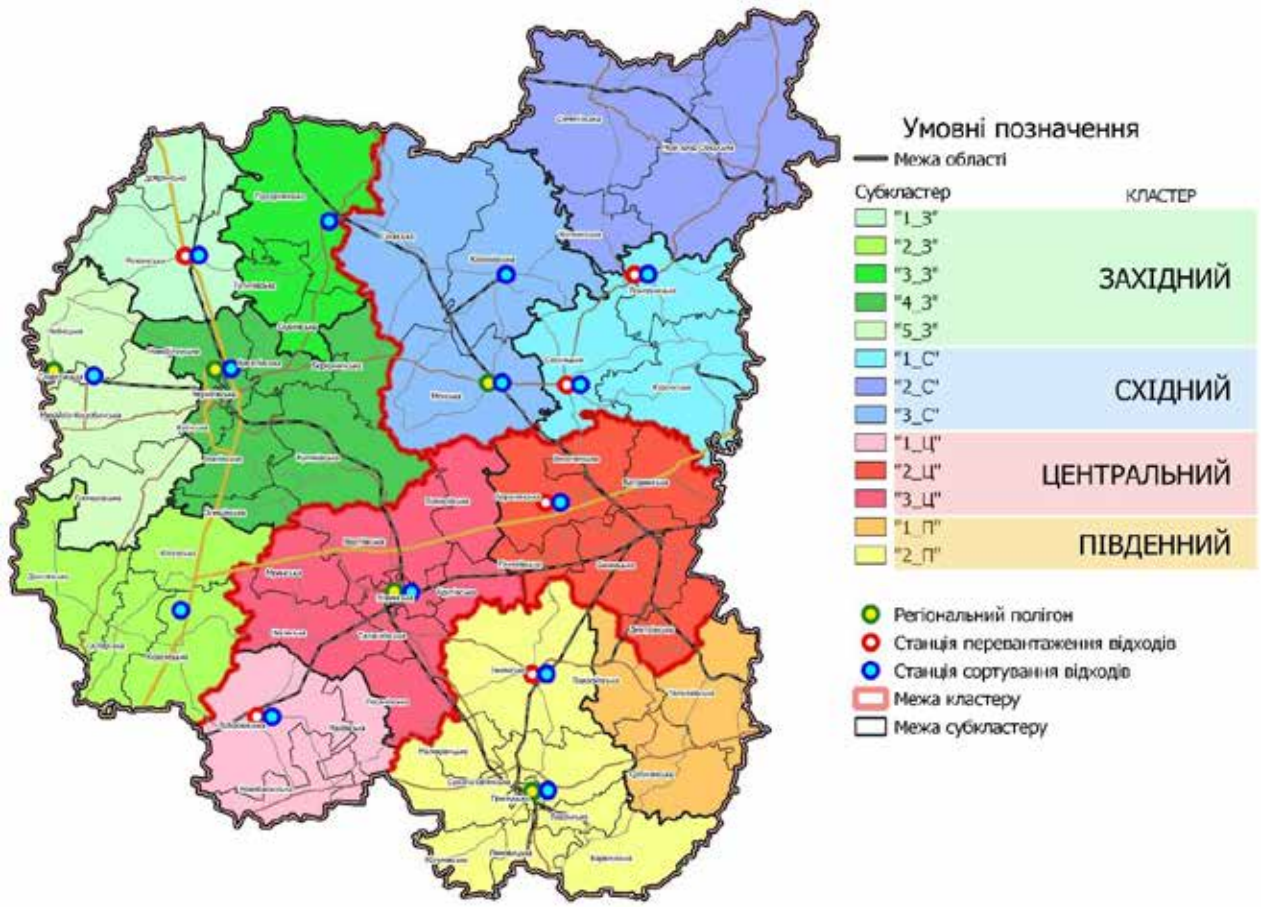


Рис. 1. Проєктована просторово-логістична (кластерна) модель управління побутовими відходами у Чернігівській області

наявного обласного автопарку (141 одиниця спецтехніки) становить 53,7%, що робить таку логістику економічно недоцільною.

Математично точку беззбитковості (відстань рівноцінності L, км) для впровадження дворівневої логістики розраховано за формулою:

$$L = \frac{P_{ts}}{C_{dir} - C_{cons}},$$

де P_{ts} – питомі витрати на операції з перевантаження однієї тонни відходів, грн/т;

C_{dir} – питома вартість прямого транспортування спеціалізованим транспортом малої місткості, грн/(т·км);

C_{cons} – питома вартість перевезення консолідованої маси автопоїздом вантажопідйомністю понад 20 тонн, грн/(т·км).

Для проведення розрахунку та математичного моделювання логістичних маршрутів використано усереднені експертні оцінки, що спираються на поточні транспортні тарифи підприємств регіону. Базові змінні прийнято на рівні: $P_{ts} \approx 450$ грн/т, $C_{dir} \approx 15$ грн/(т·км), $C_{cons} \approx 5$ грн/(т·км). Підставивши ці значення у формулу, отримуємо точку беззбитковості: $L = 45$ км.

Отже, розрахунки встановлюють межу доцільності на рівні 40–50 км. За умови подолання більшої дистанції, економія на паливі та амортизації при транспортуванні ущільнених відходів з надлишком компенсує витрати на перевантаження, забезпечуючи сукупне зниження логістичних витрат системи на 25–30%.

Слід зазначити, що класична математична модель є дієвою лише за обов'язкової умови $C_{dir} > C_{cons}$. Однак в умовах Чернігівської області раніше згаданий фактор «безпекової логістики» (зруйновані мостові переходи, мінна небезпека) може змушувати великогабаритні автопоїзди здійснювати значні об'їзди, тоді як транспорт малої місткості здатен використовувати локальні чи тимчасові переправи. У таких локаціях питома вартість C_{cons} може наближатися до C_{dir} або навіть перевищувати її $(C_{cons} \geq C_{dir})$. За таких обставин знаменник розрахункової формули прямує до нуля, а відстань рівноцінності $L \to \infty$, що робить розбудову станцій перевантаження на цих конкретних маршрутах економічно недоцільною.

Проте варто враховувати, що просторова консолідація відходів заради логістичної економії пропорційно збільшує точкове екологічне навантаження на довкілля. Трансформація просторової моделі та концентрація потоків побутових відходів на п'яти нових регіональних полігонах зумовлює виникнення потужних стаціонарних джерел антропогенного впливу на атмосферне повітря. Для об'єктивної оцінки екологічної безпеки показники емісії від полігонів мають постійно зіставлятися з даними щодо викидів від наявних потужних стаціонарних джерел, зокрема об'єктів теплоенергетики (маркерні забруднювачі: діоксид сірки SO_2, оксиди азоту NO_x, дрібнодисперсний пил $PM_{2.5}$ та PM_{10}), якщо відстань між ними не перевищує 2–3 км.

Для практичної реалізації такого підходу розроблено архітектуру інтегрованої системи моніторингу. Технічний механізм передбачає обов'язкове встановлення автоматизованих постів контролю (АПК) на межі санітарно-захисних зон нових полігонів. Дані щодо специфічних маркерів звалищного газу (CH_4, H_2S, NH_3, НМЛОС) за допомогою технологій IoT передаватимуться до єдиної інформаційно-аналітичної системи моніторингу довкілля Чернігівської області. Інституційний механізм функціонування цієї системи базується на розподілі відповідальності: фінансування встановлення та технічне обслуговування локальних постів покладається на операторів регіональних полігонів (як обов'язкова умова отримання дозволу на оброблення відходів), тоді як агрегація даних, їх верифікація та адміністрування центрального сервера може здійснюватися органом управління якістю атмосферного повітря Чернігівської області – Департаментом екології та природних ресурсів Чернігівської обласної державної адміністрації.

Дискусійним, проте ключовим для імплементації, залишається питання фінансової стійкості запропонованої моделі. На відміну від стандартних європейських практик, де принцип «забруднювач платить» та механізми розширеної відповідальності виробника (РВВ) здатні майже повністю забезпечити рентабельність системи управління відходами, регіональна специфіка вимагає формування гібридної фінансової моделі. Значні логістичні плечі між громадами унеможливлюють покриття капітальних витрат на розбудову інфраструктури через тариф для населення без ризику соціального колапсу. Враховуючи, що такі інвестиції (CAPEX) у будівництво сучасних регіональних полігонів європейського зразка, за оцінками експертів, становлять орієнтовно від 10 до 20 млн євро для одного комплексного об'єкта [19], вони об'єктивно перевищують фінансову спроможність місцевих бюджетів в умовах тривалої економічної кризи. Отже, грантове фінансування має розглядатися не як факультативний, а як основний інструмент створення базових об'єктів оброблення та видалення відходів. Своєю чергою, кошти від впровадження РВВ повинні спрямовуватися адресно на компенсацію «логістичних розривів» при збиранні компонентів, що підлягають відновленню, на периферійних територіях створених кластерів.

Стратегічне планування має виходити за межі управління вже утвореними відходами. У перспективі інституційні зусилля повинні бути спрямовані на розробку програм із запобігання утворенню відходів, стимулювання повторного використання (зокрема, поворотної тари) та еколого-просвітницьку підтримку [9].

Головні висновки. Практична реалізація запропонованої просторово-логістичної моделі виступає фундаментальним механізмом, який гарантуватиме екологічну безпеку регіону шляхом поетапної ліквідації понад 1000 наявних МВВ (зокрема несанкціонованих звалищ) та забезпечить збалансоване ресурсокористування завдяки максимальному відновленню матеріалів й реінтеграції відходів у цикл циркулярної економіки.

Стратегічне планування системи управління побутовими відходами в Чернігівській області в умовах повоєнного відновлення та євроінтеграційних процесів вимагає докорінної зміни управлінських парадигм. У ході дослідження доведено, що збереження наявної фрагментованої моделі управління відходами в межах окремих громад є екологічно небезпечним та економічно неефективним. Обґрунтовано безальтернативність впровадження кластерної просторово-логістичної моделі, яка передбачає об'єднання інфраструктурних зусиль навколо п'яти субрегіональних центрів. Враховуючи об'єктивну специфіку Чернігівщини – низьку щільність населення, значні відстані та наявність постраждалих від бойових дій територій – ключовим механізмом життєздатності такої моделі визначено формування дворівневої логістичної мережі з обов'язковим розгортанням станцій перевантаження відходів. Це дозволяє нівелювати транспортні диспропорції та забезпечити рентабельність перевезень консолідованих партій відходів до комплексів їх оброблення.

Доведено необхідність впровадження синергетичного екологічного моніторингу атмосферного повітря для оцінки впливу нових полігонів та стаціонарних джерел забруднення. Вирішення цих завдань вимагає співробітництва громад, переходу до середньозважених тарифів та імплементації системи РВВ.

Перспективи використання результатів дослідження. Запропоновані організаційно-економічні механізми формують науково-методичне підґрунтя для розробки місцевих планів управління відходами, повністю адаптованих до жорстких безпекових реалій. Перспективи подальших наукових досліджень у цьому напрямі полягають у поглибленому дослідженні моделей тарифоутворення в умовах об'єднань територіальних громад – кластерів і субкластерів, а також у проведенні емпіричних розрахунків емісійного навантаження на атмосферне повітря (моделювання кумулятивного ефекту від полігонів та об'єктів теплоенергетики).

Література

1. Srivastava A. N., Vuppaladadiyam A. K., Koroth R. P., Pfeifer C. [et al.]. Circular economy approaches for sustainable waste management: A review on integration of AI, advanced technologies and policy recommendations. *Recycling*. 2026. Vol. 11. No. 6. P. 99. DOI: 10.3390/recycling11060099.
2. Брусенцева Т. В., Корольова Н. С., Німець Н. М., Цапко Н. С. Основні аспекти імплементації закону про управління відходами до європейського законодавства. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів.* 2023. № 2. С. 3–10. DOI: 10.20998/2220-4784.2023.02.01.
3. Кузуб О. О., Єрмолаєва Т. В., Козьміна Ю. Г. До питання щодо вирішення проблемних аспектів правового регулювання управління відходами в контексті адаптації екологічного законодавства України до ЄС. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Право.* 2024. Т. 3. № 86. С. 114–125. DOI: 10.24144/2307-3322.2024.86.3.17.
4. Войціцька К. М., Кусік Н. Б., Ревенко А. Є. Циркулярна та шерингова економіки: сутність та перспективи впровадження на територіях України в умовах російсько-української війни та в період післявоєнного відновлення. *Економіка, управління та адміністрування.* 2024. № 4(110). С. 116–124. DOI: 10.26642/ema-2024-4(110)-116-124.
5. Регіональний план управління відходами у Чернігівській області до 2033 року / Чернігівська обласна державна адміністрація. Чернігів, 2026. URL: https://eco.cg.gov.ua/web_docs/2145/2026/03/docs/%D0%A0%D0%9F%D0%A3%D0%92%20%D1%83%20%D0%A7%D0%B5%D1%80%D0%BD%D1%96%D0%B3%D1%96%D0%B2%D1%81%D1%8C%D0%BA%D1%96%D0%B9%20%D0%BE%D0%B1%D0%BB%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%96%20%D0%B4%D0%BE%202033%20%D1%80%D0%BE%D0%BA%D1%83.pdf (дата звернення: 01.07.2026).
6. Цопа В. А., Негрій Т. О., Дерюгін О. В., Чеберячко Л. М. Директиви ЄС з управління відходами та запровадження їх в Україні в рамках угоди про асоціацію. *Екологічна безпека та природокористування.* 2025. Т. 56. № 4. С. 5–19. DOI: 10.32347/2411-4049.2025.4.5-19.
7. Stocktake of national circular economy roadmaps 2025 : Report / UNIDO. 2026. URL: https://www.unido.org/sites/default/files/unido-publications/2026-01/Stocktake%20CE%20Roadmaps%202025.pdf (дата звернення: 01.07.2026).
8. Siefridt C. Circular economy act: Issues at stake : Briefing. European Parliamentary Research Service, 2026. URL: https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2026/782628/EPRS_BRI(2026)782628_EN.pdf (дата звернення: 01.07.2026).
9. Кривокульська Н. М., Гунько С. І. Стратегічні сценарії кластерної організації регіональної системи управління побутовими відходами (на прикладі Тернопільської області). *Інноваційна економіка.* 2026. № 1. С. 191–204. DOI: 10.37332/2309-1533.2026.1.19.
10. Гєнова А. В., Бігдан С. А., Шмандій В. М., Харламова О. В., Ригас Т. Є. Реалізація інтегрованої системи моніторингу задля забезпечення екологічної безпеки водних ресурсів. *Technogenic and ecological safety.* 2023. Т. 13. № 1. С. 27–30. URL: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/17449 (дата звернення: 01.07.2026).
11. Кривенко С. Модернізація системи управління відходами у контексті циркулярної економіки. *Економіка та суспільство.* 2024. № 68. DOI: 10.32782/2524-0072/2024-68-142.
12. Circular economy action plan: For a cleaner and more competitive Europe / European Commission. 2020. DOI: 10.2779/05068.

13. Практичні аспекти управління відходами в Україні. Посібник / М. О. Барінов, І. Л. Олексієвець, Д. В. Родная та ін. Київ : Поліграф плюс, 2021. 118 с. URL: https://ukrecoalliance.com.ua/wp-content/uploads/2025/04/Posibnyk_praktychni-aspekty-upravlinnia-vidkhodamy-v-Ukraini.pdf (дата звернення: 01.07.2026).
14. Синчанський С. О. Приведення законодавства України щодо управління небезпечними відходами у відповідність з вимогами права Європейського Союзу. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Право.* 2024. Вип. 86, ч. 3. С. 180–189. DOI: 10.24144/2307-3322.2024.86.3.27.
15. Куліш І. М. Управління відходами в системі соціально орієнтованої економіки. *Соціально-економічні проблеми сучасного періоду України*. 2025. Вип. 3 (173). С. 26–35. DOI: 10.36818/2071-4653-2025-3-4.
16. Кривокульська Н. М., Богач Ю. А. Сталий розвиток як об'єктивна причина реалізації екологічної політики та об'єкт управлінського впливу. *Бізнес Інформ.* 2024. № 11. С. 78–89. DOI: 10.32983/2222-4459-2024-11-78-89.
17. Про управління відходами : Закон України від 20 червня 2022 р. № 2320-IX / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text (дата звернення: 01.07.2026).
18. Про затвердження Національного плану управління відходами до 2033 року та визнання такими, що втратили чинність, деяких актів : розпорядження Кабінету Міністрів України від 20 грудня 2024 р. № 1353-р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1353-2024-%D1%80#Text (дата звернення: 01.07.2026).
19. Circular economy approaches in solid waste management: Report on inputs to national waste management plan and implementation decision revision / World Bank. 2021. URL: https://thedocs.worldbank.org/en/doc/2406f071dbd1d01040f9ffbeca3f9501-0080012022/original/Inputs-to-NWMP-and-ID-Revision-2021June.pdf (дата звернення: 01.07.2026).
20. Про схвалення Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року : розпорядження Кабінету Міністрів України від 8 листопада 2017 р. № 820-р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80#Text (дата звернення: 01.07.2026).
21. Про затвердження Методичних рекомендацій з розроблення регіональних планів управління відходами : наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 5 квітня 2024 р. № 403. URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0403926-24#Text (дата звернення: 01.07.2026).
22. Шишпанова Н. Сучасне управління відходами в громадах відповідно до принципів циркулярної економіки. *Економіка та суспільство.* 2023. № 49. DOI: 10.32782/2524-0072/2023-49-35.

Дата першого надходження статті до видання: 09.07.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Алексєєва Анна Олександрівна (Миколаїв) –кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології, Чорноморський національний університет імені Петра Могили;

Андрійчук Юрій Миколайович (Київ) – кандидат наук державного управління, завідувач Центру стратегічного аналізу та екологічної безпеки, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»;

Артеменко Наталія Федорівна (Київ) – кандидат наук з державного управління, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»;

Асмаковський Євгеній Володимирович (Чернігів) – доктор філософії, науковий співробітник лабораторії екології ґрунтових мікроорганізмів, Інститут сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва Національної академії аграрних наук України;

Бакаленко Вячеслав Андрійович (Харків) – магістр, незалежний дослідник;

Блажко Анатолій Петрович (Одеса) – доцент кафедри гідротехнічного будівництва, Одеська державна академія будівництва та архітектури;

Бойко Людмила Іванівна (Кривий Ріг) – кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник, в.о. директора, Криворізький ботанічний сад Національної академії наук України;

Бондар Олександр Іванович – доктор біологічних наук, професор, академік Національної академії аграрних наук України, директор, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»;

Босюк Альона Сергіївна (Харків) – PhD, старший викладач кафедри хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;

Броннікова Ліна Феодосіївна (Вінниця) – старший викладач кафедри землеробства, ґрунтознавства та агрохімії, Вінницький національний аграрний університет;

Ващук Вікторія Вадимівна (Львів) – кандидат технічних наук, доцент кафедри безпеки життєдіяльності, Львівський національний університет імені Івана Франка;

Вискушенко Дмитро Андрійович (Житомир) – кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри екології, Поліський національний університет;

Вишневський Анатолій Васильович (Житомир) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри лісового та садово-паркового господарства, декан факультету лісового господарства та екології, Поліський національний університет;

Вовк Микола Анатолійович (Умань) – аспірант кафедри екології, Уманський національний університет;

Врадій Оксана Ігорівна (Вінниця) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри екології та охорони навколишнього середовища, Вінницький національний аграрний університет;

Герасименко Микола Васильович (Київ) – аспірант, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»;

Глушак Дмитро Дмитрович (Івано-Франківськ) – аспірант кафедри біології та екології, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника;

Гнатів Ігор Романович (Львів) – доктор філософії з екології, старший викладач кафедра екології, Національний лісотехнічний університет України;

Гнєзділова Вікторія Ігорівна (Івано-Франківськ) – кандидат біологічних наук, доцент, завідувач кафедри біології та екології, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника;

Головко Оксана Вікторівна (Рівне) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри екології, технології захисту навколишнього середовища та лісового господарства, Національний університет водного господарства та природокористування; завідувач науково-дослідного сектору, Національний природний парк «Дермансько-Острозький»;

Григор'єв Костянти Володимирович (Миколаїв) – аспірант кафедри екології, Чорноморський національний університет імені Петра Могили;

Григор'єва Людмила Іванівна (Миколаїв) – доктор біологічних наук, професор, завідувачка кафедри екології, Чорноморський національний університет імені Петра Могили;

Григорійчук Віталій Васильович (Чернівці) – асистент кафедри географії України та регіоналістики, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича;

Грищенко Дмитро Сергійович (Житомир) – аспірант кафедри екології, Поліський національний університет;

Гурський Ігор Миколайович (Умань) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри екології, Уманський національний університет;

Д'яченко Наталя Олександрівна (Київ) – старший науковий співробітник, Державна установа «НЦ гірничої геології, геоекології та розвитку інфраструктури Національної академії наук України»;

Давидчук Дарія Вікторівна (Івано-Франківськ) – студентка ІІІ курсу факультету природничих наук, Івано-Франківський національний технічний університету нафти і газу;

Держипільський Любомир Михайлович (Косів) – кандидат біологічних наук, науковий співробітник науково-дослідного відділу, Національний природний парк «Гуцульщина»;

Дригулич Петро Григорович (Дрогобич) – кандидат геологічних наук, голова, ГО «Центр сталого розвитку громад», експерт Асоціації професіоналів довкілля «PAEW»/ Professional Association of Environmentalists of the World (PAEW);

Дригулич Сергій Петрович (Івано-Франківськ) – аспірант кафедри екології, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;

Дрозд Олена Миколаївна (Сарагоса, Іспанія) – кандидат сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник, Estación Experimental de Aula Dei, EEAD-CSIC;

Дядін Дмитро Володимирович (Київ) – кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник, Інститут водних проблем і меліорації Національної академії аграрних наук України;

Дятел Олександр Олексійович (Київ) – кандидат технічних наук,старший науковий співробітник відділу прикладної гідродинаміки, Інститут гідромеханіки Національної академії наук України;

Забарний Олексій Сергійович (Київ) – кандидат сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник лабораторії радіології аграрних і лісових екосистем відділу радіоекології і дистанційного зондування ландшафтів, Інститут агроекології і природокористування Національної академії аграрних наук України;

Зароченцева Оксана Дмитрівна (Чернівці) – кандидат біологічних наук, доцент, асистент кафедри екології та біомоніторингу, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича;

Іванов Стефан Геннадійович (Київ) – науковий співробітник, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»;

Імамов Вячеслав Одилжанович (Умань) – аспірант кафедри екології, Уманський національний університет;

Іщенко Віталій Анатолійович (Вінниця) – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, Вінницький національний технічний університет;

Кальчук Галина Володимирівна (Острiг) – старший науковий співробітник, Національний природний парк «Дермансько-Острозький»;

Касьяненко Дмитро Леонідович (Київ) – аспірант, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»;

Кірейцева Ганна Вікторівна (Житомир) – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри екології, лісівництва та сталого природокористування, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Кіт Любов Ярославівна (Львів) – кандидат технічних наук, доцент кафедри безпеки життєдіяльності, Львівський національний університет імені Івана Франка;

Ковган Ярослав Олександрович (Київ) – аспірант, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»;

Коломієць Сергій Валерійович (Київ) – кандидат технічних наук, доцент кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища, Національний транспортний університет;

Коморна Оксана Михайлівна (Житомир) – доктор філософії PhD, доцент кафедри екології, Поліський національний університет;

Коморна Оксана Михайлівна (Житомир) – доктор філософії, старший дослідник, доцент кафедри екології, Поліський національний університет;

Корнієнко Ігор Валентинович (Чернігів) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри геодезії, картографії та землеустрою, Національний університет «Чернігівська політехніка»;

Костенко Ігор Андрійович (Чернігів) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри харчових технологій та екології, Національний університет «Чернігівська політехніка»;

Кулько Тетяна Володимирівна (Чернігів) – кандидат технічних наук, доцент кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій, Національний університет «Чернігівська політехніка»;

Кучеренко Володимир Анатолійович (Умань) – аспірант кафедри екології, Уманський національний університет;

Лавріненко Вікторія Михайлівна (Київ) – кандидат біологічних наук, доцент кафедри хімії та екології, Український державний університет імені Михайла Драгоманова;

Леліченко Денис Олександрович (Київ) – молодший науковий співробітник, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»;

Лелюх Роман Юрійович (Рівне) – аспірант кафедри екології, технології захисту навколишнього середовища та лісового господарства, Національний університет водного господарства та природокористування;

Литвин Богдан Богданович (Київ) – аспірант, науковий співробітник кафедри біології рослин, Київський національний університет імені Тараса Шевченка;

Літвак Ольга Анатоліївна (Миколаїв) – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова;

Літвак Сергій Михайлович (Миколаїв) – кандидат технічних наук, професор, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова;

Луньова Оксана Володимирівна (Житомир) – доктор технічних наук, професор, кафедра екології, лісівництва та сталого природокористування, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Мандебура Святослав Васильович (Умань) – викладач кафедри біології та хімії, Уманський національний університет;

Махоніна Оксана Сергіївна (Харків) – – PhD, старший викладач кафедри хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;

Машков Олег Альбертович (Київ) – доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»;

Михайлюк Юлія Дмитрівна (Івано-Франківськ) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології, Івано-Франківський національний технічний університету нафти і газу;

Мордатенко Ігор Леонідович (Біла Церква) – кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник відділу збагачення дендрофлори, Державний дендрологічний парк «Олександрія» Національної академії наук України;

Морозова Тетяна Василівна (Київ) – доктор біологічних наук, доцент, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»;

Москальов Максим Олексійович (Дніпро) – аспірант кафедра екології та технологій захисту навколишнього середовища, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»;

Никитюк Юрій Андрійович (Житомир) – доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри екології, Поліський національний університет;

Нонік Людмила Юріївна (Житомир) – доктор філософії, доцент кафедри екології, лісівництва та сталого природокористування, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Нус Ігор Борисович (Мюнхен) – віце-президент із розвитку бізнесу в Європі, компанія «Ohmium PEM electrolyzers»;

Орфанова Марія Михайлівна (Івано-Франківськ) – завідувачка кафедри екології, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, кандидат технічних наук;

Павленко Олексій Сергійович (Житомир) – аспірант, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Паламарчук Світлана Петрівна (Київ) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри екології агросфери та екологічного контролю, Національний університет біоресурсів і природокористування України, молодший науковий співробітник наукового відділу, Парк-пам'ятка садово-паркового мистецтва загальнодержавного значення «Межигір'я»;

Панас Наталія Євгенівна (Львів) – кандидат біологічних наук, доцент кафедри екології та захисту довкілля, Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнології імені С.З. Гжицького;

Парахненко Владислав Геннадійович (Умань) – доктор філософії з наук про Землю, старший викладач кафедри екології, Уманський національний університет;

Пасайлюк Марія Василівна (Косів) – кандидат біологічних наук, старший дослідник, заступник директора з наукової роботи, Національний природний парк «Гуцульщина»;

Пасічник Микола Дмитрович (Чернівці) – кандидат географічних наук, доцент кафедри географії України та регіоналістики, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича;

Пахомов Олександр Євгенійович (Кам'янське) – доктор біологічних наук, професор, професор кафедри екології та охорони навколишнього середовища, Дніпровський державний технічний університет;

Пацева Ірина Григорівна (Житомир) – доктор технічних наук, професор кафедри екології, лісівництва та сталого природокористування, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Перебинос Альона Ростиславівна (Київ) – кандидатка технічних наук, асистентка кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці, Київський національний університет будівництва і архітектури;

Писаревська Соломія Василівна (Львів) – кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри безпеки життєдіяльності, Львівський національний університет імені Івана Франка;

Піціль Андрій Орестович (Житомир) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри екології, Поліський національний університет;

Поліщук Дмитро Володимирович (Кременчук) – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільного транспорту та транспортних технологій, Філія Класичного приватного університету в місті Кременчук;

Понікарчик Сергій Валерійович (Умань) – аспірант кафедра екології, Уманський національний університет;

Присяжний Володимир Ілліч (Київ) – кандидат технічних наук, професор, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»;

Ригас Тетяна Євгенівна (Кременчук) – кандидат технічних наук, доцент кафедри екології та біотехнологій, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського;

Різничук Надія Іванівна (Івано-Франківськ) – кандидат біологічних наук, доцент кафедри біології та екології, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника;

Руденко Валерій Петрович (Чернівці) – доктор географічних наук, професор, завідувач кафедри економічної географії та екологічного менеджменту, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича;

Руденко Світлана Степанівна (Вінниця) – доктор біологічних наук, професор, професор кафедри ботаніки та екології, Донецький національний університет імені Василя Стуса;

Руденко Степан Валерійович (Чернівці) – кандидат географічних наук, науковий співробітник кафедри екології та біомоніторингу (науковий співробітник наукового гранту – «Горизонт RESTPOLL»), Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича;

Сазанська Марія Сергіївна (Одеса) – студентка V курсу факультету гідрометеорології і екології, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова;

Саприкін Володимир Юрійович (Київ) – кандидат геологічних наук, науковий співробітник, Державна установа «Науково-інженерний центр радіогідрогеоекологічних полігонних досліджень Національної академії наук України»;

Себко Вадим Вадимович (Харків) – доктор технічних наук, професор кафедри хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;

Семергей-Чумаченко Аліна Борисівна (Одеса) – кандидат географічних наук, доцент кафедри метеорології та кліматології, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова;

Сербенюк Ганна Анатоліївна (Київ) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри екології агросфери та екологічного контролю, Національний університет біоресурсів і природокористування України, молодший науковий співробітник наукового відділу, Парк-пам'ятка садово-паркового мистецтва загальнодержавного значення «Межигір'я»;

Смірнов Олександр Євгенович (Київ) – кандидат біологічних наук, доцент кафедри бології рослин, Київський національний університет імені Тараса Шевченка;

Соколов Армен Валерійович (Київ) – аспірант, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»;

Солошенко Вікторія Сергіївна (Біла Церква) – кандидат біологічних наук, науковий співробітник лабораторії насінництва та первинного випробування інтродукованих рослин, Державний дендрологічний парк «Олександрія» Національної академії наук України;

Сопов Дмитро Сергійович (Одеса) – доктор філософії з наук про Землю, доцент, доцент кафедри геодезії, землеустрою та земельного кадастру, Одеський державний аграрний університет;

Сопова Надія Валеріївна (Харків, Одеса) – доктор філософії з наук про Землю, старший викладач кафедри управління земельними ресурсами, геодезії та кадастру, Державний біотехнологічний університет; старший викладач кафедри геодезії, землеустрою та земельного кадастру, Одеський державний аграрний університет;

Сорочинська Олена Леонідівна (Київ) – кандидат історичних наук, доцент кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища, Національний транспортний університет;

Степова Олена Валеріївна (Полтава) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри прикладної екології та хімії, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»;

Суслова Олена Петрівна (Кривий Ріг) – кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник відділу інтродукції та акліматизації рослин, Криворізький ботанічний сад Національної академії наук України;

Суходольська Ірина Леонідівна (Рівне) – кандидат біологічних наук, доцент кафедри олімпійського та професійного спорту, туризму і рекреації, Рівненський державний гуманітарний університет,

Сухомлин Марина Миколаївна (Київ) – доктор біологічних наук, професор, директор, Державна установа «Інститут еволюційної екології Національної академії наук України»;

Сухомлін Людмила Володимирівна (Харків) − кандидат економічних наук, доцентка кафедри геоінформаційних технологій та космічного моніторингу Землі, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»;

Таран Наталія Юріївна (Київ) – доктор біологічних наук, доцент кафедри біології рослин, Київський національний університет імені Тараса Шевченка;

Тараненко Арсеній Сергійович (Київ) – аспірант кафедри екології та технології рослинних полімерів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Телима Сергій Васильович (Київ) – кандидат технічних наук, завідувач відділом прикладної гідродинаміки, старший науковий співробітник, Інститут гідромеханіки Національної академії наук України;

Терпеливець Станіслав Ігорович (Івано-Франківськ) – аспірант кафедри біології та екології, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника;

Тимошук Світлана Василівна (Львів) – кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри безпеки життєдіяльності, Львівський національний університет імені Івана Франка;

Тимченко Ірина Андріївна (Київ) – кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу систематики та флористики судинних рослин, Інститут ботаніки імені М.Г. Холодного Національної академії наук України;

Тимчук Катерина Юріївна (Чернівці) – доктор філософії, асистент кафедри медичної біології та генетики, Буковинський державний медичний університет;

Трус Інна Миколаївна (Київ) – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри екології та технології рослинних полімерів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Фіцайло Тетяна Василівна (Київ) – кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу геоботаніки та екології, Інститут ботаніки імені М.Г. Холодного Національної академії наук України;

Фокшей Стелла Ігорівна (Косів) – заступник начальника науково-дослідного відділу, Національний природний парк «Гуцульщина»;

Фролов Валерій Федорович (Полтава) – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри прикладної екології та хімії, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»;

Хоменко Світлана Володимирівна (Житомир) – аспірантка кафедри екології, лісівництва та сталого природокористування, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Хрутьба Вікторія Олександрівна (Київ) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища, Національний транспортний університет;

Цибуля Сергій Дмитрович (Чернігів) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри харчових технологій та екології, Національний університет «Чернігівська політехніка»;

Черевко Ірина Анатоліївна (Київ) – кандидат геологічних наук, завідувач сектору, Національний заповідник «Києво-Печерська лавра»;

Чернякова Оксана Іванівна – старший викладач кафедри екології та охорони довкілля, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова;

Чугай Ангеліна Володимирівна (Одеса) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри екології та охорони довкілля, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова;

Шевченко Наталія Олександрівна (Умань) – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри екології, Уманський національний університет;

Шепель Вікторія Вікторівна (Одеса) – аспірантка кафедри метеорології та кліматології, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова; старший викладач кафедри судноводіння, Національний університет «Одеська морська академія»;

Шмандій Володимир Михайлович (Кременчук) – доктор технічних наук, професор кафедри екології та біотехнологій, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського;

Яковенко Олександр Іванович (Чернігів) – кандидат біологічних наук, доцент кафедри екології, географії та природокористування, Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка, науковий співробітник сектору палеогеографії, Інститут географії Національної академії Наук України;

Яковишина Тетяна Федорівна (Дніпро) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»;

Яремко Зіновій Михайлович (Львів) – доктор хімічних наук, професор кафедри безпеки життєдіяльності, Львівський національний університет імені Івана Франка.

Наукове видання

ЕКОЛОГІЧНІ НАУКИ

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ **5(68)**

- ***Екологічна безпека міста***
- ***Екологічна безпека***
- ***Екологічний моніторинг***
- ***Екологічний моніторинг наслідків воєнних дій***
- ***Екологія атмосферного повітря***
- ***Екологія виробництва***
- ***Екологія водних ресурсів***
- ***Екологія екосистем***
- ***Екологія земельних ресурсів***
- ***Екологія зрошувальних систем***
- ***Екологія лісових екосистем***
- ***Екологія стічних вод***
- ***Загальні проблеми екологічної безпеки***
- ***Збереження біологічного та ландшафтного різноманіття***
- ***Зміни клімату***
- ***Теоретична екологія***
- ***Управління відходами***

Адреса редакції:
Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корпус 2, Київ, 03035;
тел. +380 99 428 67 00;
www.ecoj.dea.kiev.ua
e-mail: info@ecoj.dea.kiev.ua

Видавничий дім «Гельветика»
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7623 від 22.06.2022 р.
Україна, 65101, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1
Тел. +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.ua

Дата розміщення онлайн – 09.11.2026 р.
Дата друку – 16.11.2026 р. Формат 64x84/8.
Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman. Цифровий друк.
Ум. друк. арк. 49,40. Тираж 100. Замовлення № 1026/861.
Ціна договірна. Віддруковано з готового оригінал-макета