

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

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

ЕКОЛОГІЧНІ НАУКИ

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

2(65)



Видавничий дім
«Гельветика»
2026

Екологічні науки : науково-практичний журнал / Головний редактор Бондар О. І. – К. :
Видавничий дім «Гельветика», 2026. – № 2(65). – 412 с.

Головний редактор: Бондар О. І., доктор біологічних наук

Заступник головного редактора – відповідальний редактор: Сікачина В. Г.

Науковий редактор: Машков О. А., доктор технічних наук

Редакційна колегія:

Новосвят А., доктор інженерних наук

Баби́чев С. А., доктор технічних наук

Єрмаков В. М., доктор технічних наук

Запорожець О. І., доктор технічних наук

Маркіна Л. М., доктор технічних наук

Машков О. А., доктор технічних наук

Морозова Т. В., доктор біологічних наук

Машков В. А., доктор технічних наук

Улицький О. А., доктор геологічних наук

Риженко Н. О., доктор біологічних наук

Фролов В. Ф., доктор технічних наук

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).

На підставі Наказу Міністерства освіти і науки України № 409 від 17.03.2020 р. (додаток 1) журнал внесений до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б») у галузі біологічних наук (Е1 – Біологія та біохімія), природничих наук (Е2 – Екологія, Е4 – Науки про Землю) та технічних наук (G2 – Технології захисту навколишнього середовища).

Журнал публікує (після рецензування та редагування) статті, які містять нові теоретичні та практичні здобутки в галузі екологічних наук.

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)*

ЗМІСТ

ЕКОЛОГІЧНЕ ВІДНОВЛЕННЯ ТА РОЗВИТОК УКРАЇНИ.....	9
Бондар О.І., Машков О.А., Присяжний В.І. Напрямки застосування системного підходу щодо екологічного відновлення та розвитку України.....	9
ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА.....	18
Бойко В.М. Оцінювання ефективності природоохоронних заходів на автозаправних станціях.....	18
Дичко А.О., Демчук Л.І., Крюковська Л.І., Кагукіна А.М., Бельмега І.В. Інженерне забезпечення пірогенної стійкості та екологічна стабілізація лісових екосистем у зонах інтенсивного техногенезу.....	23
Коновалюк С.Ю., Кірейцева Г.В., Кірейцев В.О. Формування викидів забруднюючих речовин на технологічних стадіях виробництва цементу.....	28
Кривенко Г.М. Безпечна експлуатація промислових трубопроводів як чинник сталого розвитку.....	33
Мельник-Шамрай В.В., Шамрай В.І., Пацева І.Г., Циганенко-Дзюбенко І.Ю. Екологічні наслідки лісових пожеж та удосконалення системи протипожежних заходів у лісових екосистемах Житомирської області.....	39
Мідик С.В., Сенін С.А., Корнієнко В.І., Семенко Л.О., Хижняк С.В., Березовський О.В., Полтавченко Т.В., Ладогубець О.В. Оцінка рівня забруднення та екологічних ризиків за вмістом широкого спектра конгенерів ПХБ у компонентах довкілля.....	48
Prykhodko K.V. Implementation of an autonomous self-evolving and self-healing algorithm for AI-orchestrated hybrid pollution models in real-time roadside pollution control systems.....	53
Степова О.В., Тягній Л.М. Споруда біологічної очистки – біоплато BioWT.....	57
ЕКОЛОГІЯ АГРОВИРОБНИЦТВА.....	63
Kovka N.S., Verhelis V.I. Biotechnological potential of effective microorganisms in restoring soil fertility and increasing the resistance of oilseed radish (<i>Raphanus sativus</i> var. <i>Oleiformis</i>) plants in agroecosystems.....	63
Самар А.В. Екологізація хімічної підготовки майбутніх агрономів як основа формування професійної компетентності в умовах сталого розвитку.....	74
ЕКОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА.....	78
Владимиров Р.В. Математичне моделювання у емпіричних та науково-дослідних завданнях геології родовищ вуглеводнів.....	78
Касьяненко Д.Л., Улицький О.А., Дяченко Н.О. Розробка інтегрального критерію екологічної збалансованості території для кар'єрної та змішаної систем розробки (на прикладі Гуляйпільського родовища).....	83
Клід В.В., Харченко Ю.В., Демчина Р.О. Токсичний вплив мікропластику на водні екосистеми та людину.....	89
Ковров О.С., Кулікова Д.В., Баланюк А.Д., Іщенко Ю.Д., Богун А.С. Дослідження біорізноманіття фітоценозу та біокрастових мікроорганізмів промислового відвалу «Петровський» ПРАТ «ЦГЗК» м. Кривий Ріг.....	93
ЕКОЛОГІЯ ВОДНИХ РЕСУРСІВ.....	100
Бобков М.О., Піціль А.О., Никитюк Ю.А., Вишкушенко Д.А., Коморна О.М. Моніторинг гідрохімічних показників річки Тетерів у межах м. Житомир.....	100
Божко Т.В. Екологічні та токсикологічні чинники переходу між сапробними зонами (на прикладі окремих водних ділянок басейну Сіверського Дінця).....	112
Васенко О.Г., Черба О.В. Комплексний підхід до оцінювання вартісної цінності екосистемних послуг водних об'єктів.....	120
Григорійчук В.В., Пасічник М. Д., Кушнір Т.Ю. Морфологічні особливості та водний режим річки Совиця Ставчанська і її приток.....	126
Даус М.Є. Антропогенне навантаження та оцінювання якості води у басейні річки Хаджидер.....	134
Крисінська Д.О., Беркань К.В., Тимченко І.В. Оцінювання показників фізіологічної повноцінності питної води з точок розливу у місті Миколаєві.....	142

Магась Н.І. Оцінка якості води та екологічного ризику річки Інгул в умовах антропогенного та кліматичного впливу.....	152
Остапенко В.В., Веселовський Д.М., Макарова О.В., Григор'єва Л.І. Водяні рослини та їх роль в екологічній та радіаційній ємності водойм Південно-Бузької річкової екосистеми.....	168
Петровська М.А., Захарова В.І., Ваньо Н.О. Еколого-гігієнічна оцінка систем водопостачання міста Миколаєва в межах басейну річки Дністер.....	173
Хоменко О.М., Жицька Л.І., Папач В.В., Частокіленко І.П. Екологічна оцінка якості підземних вод КП «ВОДГЕО» м. Сміла та перспективні шляхи удосконалення технології їх очищення.....	178
ЕКОЛОГІЯ ЗЕМЕЛЬНИХ РЕСУРСІВ.....	187
Бабенко В.М., Мандрик О.М. Геоекологія як міждисциплінарний інструмент дослідження рівня забруднення ґрунтів радіонуклідами важких металів.....	187
Руденко С.В., Руденко В.П. Природно-ресурсний потенціал українських етнічних (історико-географічних) земель у сучасному вимірі.....	192
Shevchyk-Kostiuk L.Z., Romaniuk O.I., Romaniuk H.V., Boretska I.Yu. Using sunflower husks for the remediation of oil-contaminated soils.....	197
ЕКОЛОГІЯ І БУДІВНИЦТВО.....	204
Олійник Т.П., Маковецька О.О., Романюта Є.В. Енергоефективна архітектура громадських будівель через біоморфно-алгоритмічний синтез.....	204
ЕКОЛОГІЯ ТРАНСПОРТУ.....	211
Шелудченко Л.С., Комарницький С.П., Фірман Ю.П. Теоретичні засади екологізації транспортно-логістичної діяльності відповідно до принципів сталого розвитку.....	211
ЕКОЛОГІЯ МІСТА.....	216
Бессонова В.П., Іванченко О.Є., Казинян А.В. Формування зелених коридорів лівобережної частини м. Дніпро.....	216
ЕКОЛОГІЯ БОЛОТНИХ СИСТЕМ.....	231
Вергельська Н.В., Власенко О.В., Покшевицький А.С. Модель каскадних геохімічних ефектів промислового видобутку торфу на суміжні природоохоронні об'єкти.....	231
Масовець Б.П., Суходольська І.Л., Портухай О.І., Франчук М.В. Зміни хімічного складу води різних типів біотопів болотного масиву Сомине (Рівненський природний заповідник).....	239
ЕКОЛОГІЯ БІОРІЗНОМАНІТТЯ.....	246
Гулай В.В. Наукова характеристика проектного ландшафтного заказника загальнодержавного значення «Заплава Дніпра».....	246
Ковтун Т.І. Динаміка показників біорізноманіття угруповань noctuoidea (lepidoptera) урбоєкосистеми та приміської зони м. Житомир.....	252
Луцюк Т.М., Колодій В.А., Гордій Н.М. Популяційна динаміка рідкісних видів у контексті антропогенного тиску.....	259
Сікора В.І., Григорчук І.Д. Фітоіндикаційний потенціал синантропних трав'янистих рослин в урбанізованому середовищі.....	263
ЕКОЛОГІЯ ЕКОСИСТЕМ.....	268
Житова О.П., Мороз В.В., Шелюк Ю.С. Організація пожежної профілактики та протипожежної агітації у лісових екосистемах філії «Столичний лісовий офіс» ДП «Ліси України».....	268
Пічура В.І., Потравка Л.О. Воєнно зумовлена деградація зрошуваних екосистем Херсонської області: геоінформаційний та дистанційний аналіз.....	274

ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ	286
Бусленко Л.В., Теплюк В.С. Біомоніторинг мисливських тварин як індикатор стану природних екосистем у контексті антропогенного навантаження.....	286
Федонюк В.В., Павлюк М.М. Порівняльний аналіз комфортності клімату за біокліматичним індексом В. Г. Бокші у Луцьку та Свіязі.....	293
ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА АЗС	299
Radomska M.M., Huz V.V. The assessment of population exposed to the risks of filling stations operation.....	299
МОНІТОРИНГ ЕКОЛОГІЧНИХ НАСЛІДКІВ ВОЄННИХ ДІЙ	307
Гребенюк Т.В., Броницький В.О., Ган О.В., Кот І.Т. Інтеграція даних дистанційного зондування землі та CAD-моделювання у процеси оцінки впливу на довкілля і відновлення територій після воєнних дій.....	307
ЗМІНА КЛІМАТУ	313
Коваленко Ю.Л., Ломакіна О.С. Динаміка глобальних викидів парникових газів та екстремальна спека в Україні: прогностичні кліматичні ризики.....	313
Матухно О.В. Трансформація кліматичної політики України в умовах війни та євроінтеграції. Оцінювання кризь призму climate change performance index.....	320
Совгіра С.В., Кочубей О.В., Душечкіна Н.Ю. Моніторинг кліматичних змін за наслідками забруднення неорганічними речовинами річки Південний Буг.....	327
УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ	332
Бойко Т.В., Дочинець В.В., Король К.А., Попович Н.П., Шуплат Т.І. Екологічні ризики експлуатації полігонів побутових відходів в межах урбанізованих територій.....	332
Серга Т.М., Голік Ю.С. Вологість та зольність побутових відходів і торфу родовищ Полтавщини.....	339
Sorochynska O.L. An environmentally sustainable approach to demolition waste in the reconstruction process of Ukraine.....	345
ПРАКТИКА ЕКОЛОГІЧНОГО УПРАВЛІННЯ	353
Герасимчук О.Л., Шевчук Л.М., Васільєва Л.А. Кадастрове забезпечення ландшафтного підходу до управління земельно-водними системами на регіональному рівні.....	353
ТЕОРЕТИЧНА ЕКОЛОГІЯ	359
Бутенко О.Г., Карамушко А.В., Васютинська К.А., Мельник С.В., Бизова М.Б. Транскордонне співробітництво як механізм реалізації цілей сталого розвитку.....	359
Зеленчук І.Д., Сонько С.П. Рекультивация та фіторе mediaція у системі ландшафтно-екологічної реабілітації техногенно трансформованих територій.....	368
Kuznietsov S.I., Bezpalchenko V.M., Semenchenko O.O., Ivkina Ye.S. Study of kinetic parameters of catalytic additive oxidation of carbon monoxide.....	377
Лавріненко К.В., Спрягайло О.А., Спрягайло О.В., Гаврилюк М.Н., Ілюха О.В., Шевчик В.Л. Громадянська наука як інструмент моніторингу інвазійних видів (на прикладі Черкаської області).....	382
Парахненко В.Г., Гончарук В.В., Мандебура С.В. Розроблення інтегрованої системи екологічного інспектування для підвищення рівня екологічної безпеки природних та урбанізованих територій на засадах загальної екології.....	392
Яненко В.С. Розробка та апробація бальної системи оцінки екологічного ризику для орнітофауни в зоні впливу вітрових електростанцій.....	399
ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ	405

CONTENTS

ECOLOGICAL RESTORATION AND DEVELOPMENT OF UKRAINE.....	9
Bondar O., Mashkov O., Prysyzhny V. Directions for application of a systemic approach to the ecological revival and development of Ukraine.....	9
ENVIRONMENTAL SAFETY.....	18
Boiko V. Evaluation of the effectiveness of environmental protection measures at gas stations.....	18
Dychko A., Demchuk L., Kryukivska L., Kagukina A., Belmega I. Engineering support of pyrogenic resistance and ecological stabilization of forest ecosystems in areas of intensive technogenesis.....	23
Konovaliuk S., Kireitseva H., Kireitsev V. Formation of pollutant emissions at the technological stages of cement production.....	28
Kryvenko G. Safe Operation of Industrial Pipelines as a Factor of Sustainable Development.....	33
Melnyk-Shamrai V., Shamrai V., Patseva I., Tsyhanenko-Dziubenko I. Ecological consequences of forest fires and improvement of the fire protection system in forest ecosystems of Zhytomyr region.....	39
Midyk S., Senin S., Korniyenko V., Semenko L., Khyzhnyak S., Berezovskyi O., Poltavchenko T., Ladohubets E. Assessment of the level of pollution and environmental risks based on the content of a broad spectrum of PCB congeners in environmental components.....	48
Prykhodko K.V. Implementation of an autonomous self-evolving and self-healing algorithm for AI-orchestrated hybrid pollution models in real-time roadside pollution control systems.....	53
Stepova O., Tiahnii L. Biological treatment facility – bioWT bioplateau.....	57
ECOLOGY OF AGRICULTURAL PRODUCTION.....	63
Kovka N.S., Verhelis V.I. Biotechnological potential of effective microorganisms in restoring soil fertility and increasing the resistance of oilseed radish (<i>Raphanus sativus</i> var. <i>Oleiformis</i>) plants in agroecosystems.....	63
Samar A. The ecologization of chemical training for future agronomists as the foundation for the formation of professional competence in the context of sustainable development.....	74
ECOLOGY OF PRODUCTION.....	78
Vladimirov R. Mathematical modeling in empirical and research problems of hydrocarbon fields geology.....	78
Kasyanenko D., Ulytskyi O., Dyachenko N. Development of an integral criterion of ecological balance of the territory for quarry and mixed development systems (on the example of the Gulyaipil deposit).....	83
Klid V., Kharchenko Y., Demchyna R. Toxic effects of microplastics on aquatic ecosystems and humans.....	89
Kovrov O., Kulikova D., Balanyuk A., Ishchenko Yu., Bohun A. Study of phytocoenosis and biocrust microorganisms biodiversity of the “Petrovskiy” industrial waste dump of PJSC “CGOK”, Kryvyi Rih.....	93
ECOLOGY OF WATER RESOURCES.....	100
Bobkov M., Pitsil A., Nykytiuk Yu., Vyskushenko D., Komorna O. Monitoring of Hydrochemical Indicators of the Teteriv River within the City of Zhytomyr.....	100
Bozhko T. Ecological and Toxicological Factors of Transition Between Saprobic Zones (Case Study of Specific Water Segments in the Siversky Donets River Basin).....	112
Vasenko O., Cherba O. A comprehensive approach to assessing the monetary value of ecosystem services provided by water bodies.....	120
Pasichnyk M., Hryhoriichuk V., Kushnir T. Morphological characteristics and water regime of the Sovytsia Stavchanska river and its tributaries.....	126
Daus M. Anthropogenic pressure and assessment of water quality in the Khadzhide river basin.....	134
Krysinaka D., Berkan K., Tymchenko I. Evaluation of physiological completeness indicators of drinking water from bottling points in the city of Mykolaiv.....	142
Magas N. Water Quality and Ecological Risk of the Inhul River under Climate Change and Anthropogenic Pressure.....	152

Ostapenko V., Veselovskyi D., Makarova E., Grygorieva L. Accumulation of chemical and radionuclide pollutants by aquatic plants in the Southern Buzka river ecosystem.....	168
Petrovska M., Zakharova V., Vanyo N. Environmental and hygienic assessment of the water supply systems of the city of Mykolaiv within the Dniester river basin.....	173
Khomenko O., Zhytska L., Papach V., Chastokolenko I. Ecological assessment of the quality of groundwater of the municipal enterprise «VODGEO» of the city of Smila and promising ways to improve the technology of their purification.....	178
ECOLOGY OF LAND RESOURCES.....	187
Babenko V., Mandrykh O. Geoecology as an interdisciplinary tool for studying the level of soil contamination by heavy metal radionuclides.....	187
Rudenko S., Rudenko V. Nature-resource potential of Ukrainian ethnic (historic-geographical) lands in present-day dimension.....	192
Shevchyk-Kostiuk L.Z., Romaniuk O.I., Romaniuk H.V., Boretska I.Yu. Using sunflower husks for the remediation of oil-contaminated soils.....	197
ECOLOGY AND CONSTRUCTION.....	204
Oliinyk T., Makovetska O., Romaniuta Ye. Energy-efficient architecture of public buildings through biomorphic-algorithmic synthesis.....	204
ECOLOGY OF TRANSPORT.....	211
Sheludchenko L., Komarnitskyi S., Firman Yu. Theoretical framework for the environmentalization of transport and logistics activities in the context of sustainable development principles.....	211
URBAN ECOLOGY.....	216
Bessonova V., Ivanchenko O., Kazinyan A. Formation of green corridors in the left-bank area of Dnipro city.....	216
ECOLOGY OF WETLAND SYSTEMS.....	231
Vergelska N., Vlasenko O., Pokshevnytskyi A. A Cascade Geochemical Effects Model of Industrial Peat Extraction on Adjacent Protected Areas.....	231
Masovets B., Sukhodolska I., Portukhai O., Franchuk M. Changes in the chemical composition of water in different biotope types of the Somyne marsh complex (Rivne Nature Reserve).....	239
ECOLOGY OF BIODIVERSITY.....	246
Hulai V. Scientific characterization of the proposed national-level landscape reserve «Dnipro floodplain».....	246
Kovtun T. Dynamics of biodiversity indicators of Noctuoidea (Lepidoptera) group of Zhytomyr's urban and suburban ecosystems.....	252
Lutsiuk T., Kolodii V., Hordii N. Population dynamics of rare species in the context of anthropogenic pressure.....	259
Sikora V., Hryhorchuk I. Phytoindication potential of synanthropic plants in urbanized environments.....	263
ECOSYSTEM ECOLOGY.....	268
Zhytova O., Moroz V., Shelyuk Yu. Organization of fire prevention and fire-prevention agitation in forest ecosystems of the «Stolychnyi forest office» branch of SE «Forests of Ukraine».....	268
Pichura V., Potravka L. War-induced degradation of irrigated ecosystems of the Kherson region: geoinformation and remote sensing analysis.....	274
ENVIRONMENTAL MONITORING.....	286
Buslenko L., Tepluk V. Biomonitoring of game animals as an indicator of the state of natural ecosystems in the context of anthropogenic pressure.....	286

Fedoniuk V., Pavlyuk M. Comparative analysis of climate comfort according to the V.G. Boksha bioclimatic index in Lutsk and Svityaz.....	293
ENVIRONMENTAL SAFETY OF PETROL STATIONS.....	299
Radomska M.M., Huz V.V. The assessment of population exposed to the risks of filling stations operation.....	299
MONITORING THE ENVIRONMENTAL CONSEQUENCES OF MILITARY ACTIONS.....	307
Hrebeniuk T., Bronytskyi V., Han O., Kot I. Integration of remote sensing data and CAD modeling into environmental impact assessment and post-war recovery processes.....	307
CLIMATE CHANGE.....	313
Kovalenko Yu., Lomakina O. Trends in global greenhouse gas emissions and extreme heat in Ukraine: projected climate risks	313
Matukhno O. Transformation of Ukraine's Climate Policy in the Conditions of War and European Integration. Assessment through the Prism of the Climate Change Performance Index.....	320
Sovhira S., Kochubei O., Dushechkina N. Climate change monitoring due to inorganic substances pollution of the Southern Bug river.....	327
WASTE MANAGEMENT.....	332
Boyko T., Dochynets V., Korol K., Popovych N., Shuplat T. Environmental risks of operating municipal waste landfills within urbanized areas.....	332
Serha T., Holik Yu. Moisture and ash content of domestic waste and peat from deposits in the Poltava region.....	339
Sorochynska O.L. An environmentally sustainable approach to demolition waste in the reconstruction process of Ukraine.....	345
ENVIRONMENTAL MANAGEMENT PRACTICE.....	353
Herasymchuk O., Shevchuk L., Vasilieva L. Cadastral support for a landscape-based approach to the management of land and water systems at the regional level.....	353
THEORETICAL ECOLOGY.....	359
Butenko O., Karamushko A., Vasiutynska K., Melnyk S., Byzova M. Cross-Border Cooperation as a Mechanism for Achieving the Sustainable Development Goals.....	359
Zelenchuk I., Sonko S. Reclamation and phytoremediation in landscape-ecological rehabilitation of anthropogenically transformed landscapes.....	368
Kuznietsov S.I., Bezpalchenko V.M., Semenchenko O.O., Ivkina Ye.S. Study of kinetic parameters of catalytic additive oxidation of carbon monoxide.....	377
Lavrinenko K., Spriahailo O.A., Spriahayilo O.V., Havryliuk M., Iliukha O., Shevchyk V. Citizen science as a tool for monitoring invasive species (a case study of the Cherkasy region).....	382
Parakhnenko V., Goncharuk V., Mandebura S. Development of an integrated environmental inspection system to improve the environmental safety of natural and urban areas based on general ecology.....	392
Yanenko V. Development and testing of a scoring system for environmental risk assessment of avifauna in the influence zone of wind farms.....	399
AUTHORS' CREDENTIALS.....	405

ЕКОЛОГІЧНЕ ВІДНОВЛЕННЯ ТА РОЗВИТОК УКРАЇНИ

УДК 504:3703; 502; 541;553

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.2-65.1>

НАПРЯМКИ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМНОГО ПІДХОДУ ЩОДО ЕКОЛОГІЧНОГО ВІДНОВЛЕННЯ ТА РОЗВИТКУ УКРАЇНИ

Бондар О.І., Машков О.А., Присяжний В.І.

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

Обґрунтовано методологічні засади застосування системного підходу щодо усунення загроз екологічних катастроф як наслідок бойових дій, екологічного відновлення та розвитку України. Актуальність дослідження пов'язана з тим, що раніше такі методики, технологія методів використання не розроблялися. Вона, зокрема, передбачає: означення стану виникнення проблем екологічного відродження зруйнованих територій із застосуванням аерокосмічних технологій та систем штучного інтелекту; оцінку екологічної характеристики зруйнованих територій як складної організаційної системи; формування організаційно-правових засад державного управління з ліквідації екологічних наслідків бойових дій; розгляд наукових аспектів екологічної безпеки з питань ліквідації наслідків бойових дій; означення гуманітарних проблем екологічної безпеки (із врахуванням наслідків бойових дій). Організаційно-правові засади державного управління з ліквідації екологічних наслідків бойових дій містять такі аспекти екологічної безпеки зруйнованих територій: економічний та організаційно-управлінський з питань екологічної безпеки; основні вимоги до нормування якості стану навколишнього середовища в напрямку забезпечення екологічної безпеки; технологічні. Означено, що розв'язання проблем екологічної безпеки на зруйнованих територіях вимагає обов'язкового врахування економічних, інженерних, соціальних та інших факторів, загальнолюдських цінностей і, зважаючи на обмеженість ресурсів, не тільки найближчих, але й віддалених наслідків рішень у цій сфері, що приймаються сьогодні. Системний підхід в організації державного управління із застосування аерокосмічних технологій та систем штучного інтелекту дозволить здійснити екологічне відродження довкілля країни та поступово й послідовно забезпечити сталий розвиток регіонів. Напрямами подальших досліджень із застосуванням системного підходу щодо ліквідації загроз екологічних катастроф, як наслідок бойових дій, слід вважати розроблення методології формування відповідних інформаційних, організаційних та оперативних управлінських рішень із застосуванням аерокосмічних технологій та систем штучного інтелекту, спрямованих на приведення природокористування зруйнованих бойовими діями територій у відповідність до вимог екологічної безпеки в нинішніх економічних умовах. *Ключові слова:* аерокосмічні технології, державне управління, екологічна безпека, екологічні загрози, організаційно-правові засади, системний підхід, системи штучного інтелекту, складна організаційна система, управлінські рішення.

Directions for application of a systemic approach to the ecological revival and development of Ukraine. Bondar O., Mashkov O., Prisyazhny V.

The article substantiates the methodological approach to the application of a systemic approach to the elimination of threats of environmental disasters as a result of hostilities, ecological revival and sprawl of Ukraine. The research issues are related to the fact that the technology for applying a systemic approach to ecological revival and development has not been developed before, which involves: determining the state of the issue of the emergence of problems of ecological revival of destroyed territories with the use of aerospace technologies and artificial intelligence systems; assessing the ecological characteristics of destroyed territories as a complex organizational system; forming organizational and legal principles of state administration for the elimination of the environmental consequences of hostilities; considering scientific aspects of environmental safety in the issues of the elimination of the consequences of hostilities; determining humanitarian aspects of environmental safety (taking into account the consequences of hostilities). The organizational and legal principles of state administration for the elimination of the environmental consequences of hostilities include: the economic aspect of the environmental safety of destroyed territories; the organizational and managerial aspect of environmental safety; the main requirements for the standardization of environmental quality in the direction of ensuring environmental safety; technological aspects of the environmental safety of destroyed territories. It is determined that solving the problems of environmental safety in the destroyed territories requires mandatory consideration of economic, engineering, social and other factors, universal human values and, given the limited resources, not only the immediate, but also the remote consequences of decisions in this area that are made today. Only with a systemic approach in the organization of public administration using aerospace technologies and artificial intelligence systems is it possible to carry out ecological revival and gradually and consistently ensure sustainable development of regions. The



© Бондар О.І., Машков О.А., Присяжний В.І., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

directions of further research in the area of application of a systemic approach to the elimination of threats of environmental disasters as a result of hostilities should be considered the development of a methodology for the formation of relevant information, organizational and operational management decisions using aerospace technologies and artificial intelligence systems aimed at bringing the use of natural resources in the territories destroyed by hostilities into line with the requirements of environmental safety in the current economic conditions. *Key words:* aerospace technologies, public administration, environmental security, environmental threats, organizational and legal principles, systems approach, artificial intelligence systems, complex organizational system, management decisions.

Постановка проблеми. Військові дії в Україні з 2022 р. вже завдали та продовжують завдавати величезної шкоди як інфраструктурі, так і мешканцям населених пунктів, довкіллю та природним ресурсам. Нині неможливо повною мірою оцінити вплив війни на довкілля за відсутності точної інформації, навіть збирати такі дані небезпечно для фахівців, оскільки в країні тривають активні бойові дії. З іншого боку, не вся інформація може бути озвучена публічно з тактичною метою. Отже, необхідно, бодай певною мірою, спрогнозувати наслідки бойових дій, зокрема: вплив на ландшафти та селища; втрата біорізноманіття та загроза червонокнижним видам тварин та рослин; пожежі в екосистемах; хімічне забруднення від обстрілів та ракет; забруднення ґрунтів, водних ресурсів та моря нафтопродуктами; наслідки від пожеж на промислових об'єктах; забруднення органічними речовинами води внаслідок пошкодження комунальних комунікацій тощо. По війні важливо подбати про ефективну систему моніторингу стану довкілля, щоб на шляху розбудови України здійснювалися ефективні заходи з відновлення та збереження екосистем. При цьому в планах із відбудови населених пунктів доцільно передбачити прийняття відповідних рішень із адаптації до зміни клімату. Тому охорона довкілля, раціональне використання природних ресурсів, забезпечення екологічної безпеки – невід'ємна умова сталого економічного та соціального розвитку України. Бойові дії призводять до значних небезпек і мають загрозливі екологічні наслідки – забруднення підземних вод, водойм, підтоплення площ і просідання ґрунту, забруднення атмосферного повітря, знищення і псування об'єктів природно-заповідного фонду, лісові пожежі та ін.

На сьогодні, в умовах воєнного стану, в Україні не просто означити реальний масштаб та рівень забруднення навколишнього середовища. Повну оцінку нанесених збитків вдасться зробити по війні. Тому нині важливо сформувати методологію застосування системного підходу щодо усунення загроз екологічних катастроф внаслідок бойових дій, екологічного відродження та розвитку України.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідження з питань системного підходу щодо ліквідації загроз екологічних катастроф внаслідок бойових дій виконувалися українськими та іноземними фахівцями і вченими, що підтверджується відповідними публікаціями.

У праці «Екологічна безпека як фундаментальна складова національної безпеки» визначається, що при визначенні місця екологічного складника в сис-

темі національної безпеки важливий методологічний контекст полягає у стратегічному плануванні екологічної політики та визначенні особливостей формування відповідних прогностичних стратегій як складової цілісної системи національної безпеки на короткострокову та віддалену перспективу, що забезпечується системою організаційно-правових, економічних, технічних, санітарно-гігієнічних та інших заходів (Хилько, 2021) [11]. У межах монографії «Оцінка екологічної шкоди та пріоритети відновлення довкілля на сході України» висвітлені питання статистичного аналізу та прогнозування екологічних ризиків та загроз (Денисов, Аверін, Ермаков, Улицький, 2017) [4]. Так, у праці «Системний підхід до прийняття рішень у державному управлінні: методологія розв'язання задач державного управління та прийняття об'єктивних рішень з визначеною якістю» формалізовано питання системного аналізу процесів прийняття рішень в державному управлінні, розробці та обґрунтуванню інструментарію розв'язання задач державного управління, який забезпечить оцінювання якості прийнятого рішення та дозволить спроектувати максимально ефективну траєкторію його реалізації із врахуванням наявних ризиків і невизначеностей (Половцев, 2021) [9]. Авторським колективом праці «Методологія наукових досліджень і системного підходу у сфері публічного управління: механізми, важелі, методи, інструменти» означено, що формування методології наукових досліджень у сфері публічного управління за трьома основними блоками: сутнісно-цільовим, системно-методичним і проєктно-результативним – дає змогу здійснювати наукові дослідження відповідно до принципу «управління – за цілями, оцінювання – за результатами». (Івашова Л. М., Івашов М. Ф., Квеліашвілі І. М., 2020) [6]. У праці «На межі виживання: знищення довкілля під час збройного конфлікту на Сході України» здійснено комплексний аналіз стану природного середовища в умовах збройного конфлікту на Сході України, визначено стан та окреслено проблемні питання захисту довкілля (Бущенко, Блага, Загороднюк, Короткий, Мартиненко, Медведєв, Пархоменко, 2017) [2]. У низці праць звертається увага на актуальність оперативної ліквідації загроз екологічних катастроф внаслідок військових дій (Іванюта С. П., 2019) [5], Омельчук Оксана, Софія Садогурська 2022) [10]. Забезпечення екологічної безпеки держави спонукає активно розвивати нові методи впровадження системного підходу (Настасенко О. Г., Бондар О. І., Машков О. А., 2014) щодо створення системи під-

тримки відповідних екологічних рішень (Бондар О.І., Машков О.А., Міхєєв В.С., 2020) [1, 8].

Мета статті – обґрунтувати механізм застосування системного підходу щодо усунення загроз екологічних катастроф, як наслідок бойових дій на території України, екологічного відродження та розвитку України як інструмент імплементації виконавчої влади держави у логічному взаємозв'язку відповідних елементів, процесів та закономірностей.

Методи дослідження. Під час дослідження, результати якого наведені нижче, використовувалася сукупність наукових методів, до складу яких увійшли: методи системного аналізу – дослідження питання щодо виникнення проблем екологічного відродження зруйнованих територій; методи теорії складних систем – визначення екологічної характеристики зруйнованих територій як складної організаційної системи; методи синтезу управлінських рішень – для формування організаційно-правових засад державного управління з ліквідації екологічних наслідків бойових дій, розвитку України.

Результати дослідження.

1. Екологічна характеристика зруйнованих територій як складної організаційної системи.

Війна в Україні триває, але вже сьогодні необхідно турбуватися також про екологічне відновлення звільнених регіонів, тому плани екологічних реформ (стратегічне та ситуаційне екологічне управління) мають бути підготовлені заздалегідь. Реформи відновлення зруйнованих військовими діями територій мають бути ефективними (за ресурсами, часу, вартості тощо). З цією метою пропонується застосовувати аерокосмічні технології та системи штучного інтелекту. На думку авторів праці, варто (і доцільно) здійснити системне реформування адміністративно-територіального поділу на концепції сталого розвитку, зокрема, системного аналізу ситуацій в регіонах та прийняття відповідних управлінських рішень: інформаційних, організаційних, оперативних тощо.

Застосування системного підходу передбачає здійснення системних перетворень, як структурних, так і функціональних. Насамперед, необхідно комплексно здійснити економічні, соціальні, екологічні реформи. В економіці є таке поняття – санація. Це структурна перебудова та переоснащення промислових підприємства, зокрема, ліквідація застарілих та створення нових виробничих ліній. Тому для застарілих технологічно промисловості та сільського господарства санація – єдиний вихід. Держава має, на погляд авторів, позбутися збиткових галузей господарства рішуче й остаточно.

Зруйновані війною території, можливо, слід оголосити на кілька років територіями, вільними від податків, запросити туди іноземних інвесторів будувати нові підприємства з нуля. Варто подбати й про оптимальні затрати коштів на відновлення зруйнованих війною природних та техногенних об'єктів, а також й про те, як допомогти облаштуватися людям

в інших областях, де більше перспектив. Невеликі селища, ліпше розселити, щоб не витратити фінанси на відновлення та подальше підтримання інфраструктури. З метою розв'язання проблем відновлення зруйнованих війною територій та розробленням оптимального плану їхньої перебудови варто уже нині працювати у напрямку соціально-економічного-екологічного відновлення та розвитку країни, оголосити конкурс проєктів та невідкладне їх впровадження.

В умовах воєнного стану актуалізовані питання не тільки безпеки цивільного населення, але й соціально-економічні та екологічні чинники національної та регіональної безпеки. Так, в умовах бойових дій, окрім військових питань, актуальними є проблеми вразливості населення до вторинних чинників ураження – впливи на життя і здоров'я населення регіону, викликані руйнуванням потенційно небезпечних об'єктів та об'єктів критичної інфраструктури, наприклад, підтоплення, провалля і зсуви, що можуть виникнути внаслідок руйнування гідротехнічних споруд, дамб та гідроелектростанцій, різноманітні забруднення від складів і сховищ радіоактивних і токсичних речовин та відходів, нафтопродуктів, вибухівки, сильнодіючих отруйних речовин, транспортних та інженерних комунікацій тощо. Прогнозування ризику, вибір стратегії управління екологічною безпекою істотним чином залежать від того, як оцінюється ситуація (прийняття інформаційних управлінських рішень). З цією метою пропонується застосовувати аерокосмічні технології під час здійснення екологічного моніторингу. Першим питанням має стати проблема кластерного аналізу, коректної класифікації (ідентифікації): з яким типом надзвичайної екологічної ситуації ми маємо справу.

З точки зору ліквідації прямих наслідків, оцінки «статичної» ситуації, тобто без прогнозу, рушійні сили і генезис катастроф має другорядне значення. Але з точки зору системного підходу щодо управління безпекою, стратегічного планування і прогнозування ризиків, є необхідним точно визначити характер загрози та тип надзвичайних ситуацій, з якими ми маємо справу. Для цього пропонується застосовувати системи штучного інтелекту. Вони дозволяють моделювати та прогнозувати процеси розвитку надзвичайних ситуацій та надавати рекомендації щодо прийняття управлінських рішень. Тому завдання поєднання стратегічного та ситуаційного управлінств є актуальним. Зокрема, необхідно визначити з яким типом надзвичайних ситуацій доводиться працювати на зруйнованих територіях: екологічного, економічного, соціального чи військового характеру.

На сьогодні ми маємо справу із ескалацією надзвичайних ситуацій, викликаних екологічними загрозами бойових дій, що є наслідком застосування військових засобів ураження. Тому мінімізація еко-

логічних загроз та відповідне управління екологічними ризиками полягає у плануванні організаційних заходів (організаційне управління), а оперативне управління – це відповідальність центральної влади і спеціальних адміністративних органів.

Ризики в районах бойових дій мають комплексний (системний) соціально-економіко-екологічний характер. Тому їхня мінімізація полягає в ефективному реагуванні (інформаційні управлінські рішення) на джерела загроз відповідно до чинного законодавства. Визначення показника ефективності цього реагування потребує конкретизації щодо ресурсів, часу, вартості, наслідків прийняття управлінських рішень.

Під час визначення екологічних ризиків, спричинених внаслідок воєнних дій, необхідно враховувати такі небезпечні чинники:

а) артобстріли, бомбардування, застосування стрілецької зброї: воронки від розривів мін і снарядів; окопи, траншеї протитанкові рови та інші інженерні споруди військового призначення;

б) застосування літальних апаратів: падіння літальних апаратів; виникнення вибухів та пожеж у разі пошкодження літальних апаратів та їх падіння;

в) підриви та мінування промислових підприємств, у т. ч. екологічно небезпечних об'єктів (хімічних, радіаційних, метеогідрологічних); енергозабезпечення, об'єктів критичної техногенної інфраструктури;

г) пересування військової техніки (у т. ч. важкої бронетехніки);

д) підпали з виникненням пожеж на об'єктах в окупованих зонах;

е) окупація територій.

Такі чинники можуть призвести до негативних екологічних та соціальних наслідків:

– для людей;

– активність ерозійних процесів;

– виникнення пожеж з проявом небезпечних загроз (знищення або пошкодження матеріальних цінностей, висока температура, викиди в атмосферне повітря токсичних летких продуктів згоряння-забруднюючих речовин у т.ч. озоноруйнівних, парникових газів, діоксинів, фуранів, радіоактивних речовин тощо);

– забруднення водних ресурсів (наземних, підземних) екологічно небезпечними речовинами, що ускладнює, або ж і унеможливує їх використання;

– забруднення ґрунтів екологічно небезпечними важкими металами, засобами захисту рослин;

– забруднення територій внаслідок падіння літальних апаратів у т. ч. з виникненням пожеж;

– загибель живих істот та зменшення біологічного та ландшафтного різноманіття;

– знищення або вилучення з природокористування лісів, захисних лісосмуг, господарських (у т. ч. родючих) угідь;

– зменшення динаміки розвитку тваринництва;

– погіршення екологічного стану Чорного та Азовського морів, водно-болотних угідь міжнародного значення;

– негативні зміни стану (у т.ч. радіаційного) атмосферного повітря в населених пунктах;

– погіршення якості питної води з негативним впливом на здоров'я населення;

– порушення ґрунтового покриву;

– порушення екосистем та національної екологічної мережі;

– Зміни в інфраструктурі забезпечення життєдіяльності населення та територій;

– створення передумов розсіювання та забруднення ґрунтів, атмосферного повітря (пил) та водних ресурсів відходами I–III класу небезпеки тощо

Так, за інформацією з відкритих джерел щорічний обсяг викидів забруднених вод становить близько 500 млн. тон. Загальний обсяг забруднень підземних вод оцінюється в 5 млн. тон мінеральних і 300 тон аміачних солей. Нормам якості води відповідають лише близько 12% підземних джерел води. З обмеженням доступу до водних ресурсів це може стати критичним населення в кризових умовах.

Основними небезпечними речовинами, що представлені серед характерних забруднювачів водних ресурсів в регіонах є сірка та сірчані сполуки, аміак, фосфор, вугільний пилок, сірчана кислота і сульфатні сполуки, формальдегіди, свинець, ртуть, а також композитні хімічні відходи різноманітних підприємств, серед яких є сильнодіючі отруйні речовини, наприклад, мононітрохлорбензол, який є високотоксичною речовиною. Найбільшу загрозу (в середньому за до кризовими показниками), демонструють показники хімічної і біологічної небезпеки: найбільше забруднення спостерігається за індикаторами вмісту сполуки азоту, заліза, важких металів і бактеріальних забруднень. У поверхневих водах спостерігається аномально високе розповсюдження збудників захворювань, зокрема, кишкової палички, що зумовлене в тому числі незадовільною ситуацією з відходами: накопичення відходів в 3,8-4,2 рази перевищує швидкість їхньої переробки.

Будь-яке додаткове забруднення атмосфери, а особливо водних об'єктів, може стати критичним, тобто мати фатальні екологічні і соціальні наслідки для регіонів. Для реагування на загрози і планування заходів з управління екологічною безпекою необхідно знати розподіл джерел небезпеки, в перше чергу – техногенної. Основними чинниками загрози на територіях бойових дій є суттєва обмеженість доступності і зниження якості водних ресурсів, в тому числі, пов'язане з небезпекою руйнування об'єктів промисловості та інфраструктури, підвищення ймовірності порушення роботи відстійників, очисних і дренажних систем, попадання стічних вод і небезпечних відходів у джерела питної води. Це є особливою небезпекою на тлі зниження рівня

доступності медичних послуг та санітарно-епідеміологічного контролю.

Отже, станом на сьогодні, забезпечення необхідного рівня соціально-економічної, екологічної безпеки в країні за допомогою місцевих ресурсів не є можливим. Для цього необхідний системний підхід щодо організації державного управління із застосуванням аерокосмічних технологій для здійснення моніторингу та систем штучного інтелекту для моделювання та прогнозування екологічних процесів. Зволікання від прийняття необхідних науково обґрунтованих екологічних рішень лише наближає нас до імовірної катастрофічної розв'язки екологічної кризи.

2. Організаційно-правові засади державного управління щодо ліквідації екологічних наслідків бойових дій.

Беручи до уваги системний характер проблем з ліквідації екологічних наслідків бойових дій, їхню органічну кореляцію з усіма політичними, соціальними та економічними чинниками, стратегія забезпечення екологічної безпеки - це одна з фундаментальних складових національної безпеки держави. Для усунення наслідків військових дій необхідні інформаційні, організаційні та оперативні управлінські рішення. На підставі висновків національних та міжнародних експертів із застосуванням систем штучного інтелекту доцільно, на наш погляд, розробити національну програму дій щодо ліквідації наслідків бойових дій та забезпечення екологічної та техногенної безпеки населення і зруйнованих територій. При цьому, вважають автори, потрібно передбачити вжиття таких заходів: розроблення відповідної програми національних, регіональних, місцевих дій; підвищення кваліфікації фахівців – екологів управлінської ланки (стратегічний екологічний менеджмент); проведення екологічного моніторингу та прогнозування із застосуванням аерокосмічних технологій; підвищення обізнаності населення зруйнованих територій щодо державної політики у сфері відновлення інфраструктури регіонів.

Варто також організовувати та періодично проводити громадські слухання з питань забезпечення екологічної та техногенної безпеки населення і зруйнованих територій (зворотний зв'язок в системі екологічного управління).

Для реалізації таких заходів потрібні відповідні механізми впровадження системного підходу щодо ліквідації наслідків бойових дій. Як засвідчили проведені авторами праці системні дослідження, пріоритети системних рішень щодо механізмів екологічної безпеки зруйнованих територій доцільно визначати таким чином: економічні механізми екологічної безпеки; державна система управління екологічною безпекою; промислова безпека та технологічні основи екологічно безпечного розвитку промисловості, енергетики і транспорту; нормативно-правова діяльність у сфері екологічної безпеки; наукові основи

екологічної безпеки; громадські організації у сфері екологічної безпеки.

2.1. Економічні механізми забезпечення екологічної безпеки зруйнованих територій.

Ефективним способом регулювання безпеки зруйнованих територій є економічні механізми, які умовно об'єднуються у дві групи: відшкодування збитків та механізми запобігання їм.

Механізми відшкодування збитків, що виникли на зруйнованих територіях, мають забезпечувати проведення оцінки збитків, потреби у компенсаційних ресурсах та відшкодування витрат. При цьому варто розрізняти дві форми збитку – нанесений і відшкодований. Повністю оцінити збитки практично неможливо. Однак, певною мірою, можна означити завдані:

- людині, беручи до уваги додаткові витрати щодо відновлення її здоров'я та матеріального достатку);
 - природі, керуючись величинами додаткових витрат, необхідних для відновлення екологічної рівноваги;
 - народному господарству, враховуючи затрати на відшкодування збитків підприємствам.
- Важливий засіб компенсацій – система страхування, ефективного функціонування якої передбачає реалізацію низки принципів:
- тісний зв'язок страхування з картами ризику та розподіл страхових внесків між об'єктами залежно від очікуваних збитків;
 - обов'язкове страхування об'єктів з підвищеним ризиком та їхніх працівників; при цьому, як доповнення до обов'язкового, слід створити систему добровільного страхування (для населення, підприємств);
 - перетворення системи страхування на один з найважливіших елементів контролю за рівнем безпеки у регіоні.

Органи страхування мають оперативно реагувати на зміни ситуації шляхом зменшення або збільшення страхових внесків залежно від ймовірності аварії або катастрофи.

Система компенсацій відшкодовує збитки також незастрахованій частині населення та підприємств, зокрема, компенсувати втрати здоров'я, житла, роботи, продукції тощо. Необхідно створювати додаткові потужності та значні запаси коштів для відшкодування втрат виробничого та невиробничого характеру, розширювати можливості системи охорони здоров'я, мати резерв житлового фонду для біженців. До системи компенсацій входить також інвестиційна діяльність тривалого характеру, що дозволить за рахунок спеціальних резервних фондів відновити житло, об'єкти економіки та порушену екологічну рівновагу.

Механізми запобігання збиткам. Такі механізми мають забезпечувати: правовий та економічний захист діяльності щодо запобігання збиткам; правову й економічну відповідальність за збільшення

величини ризику; зацікавленість суб'єктів господарювання й управління у запобіганні ризику. Даний механізм має заходи як економічного, так і адміністративного характеру. Його складові можна умовно об'єднати у п'ять груп.

Перша група механізмів пов'язана зі зміною структури народного господарства на користь галузей, які задовольняли б потреби людини. Важливим напрямком підвищення рівня безпеки є також усунення структурних диспропорцій на користь переробних галузей, зокрема виробництв по переробці відходів вторинних ресурсів.

Друга група формується з механізмів, що мають сприяти зменшенню аварій. До них, передусім, відносяться платні квоти за ризик, що дозволяє створити ринок квот та підтримувати мінімальний рівень ризику в цілому по регіону. Придбання підприємствами інших квот ризику допускає субсидіювання заходів щодо підвищення безпеки.

Такий, власне, економічний механізм може доповнюватися адміністративно-економічними заходами. Насамперед йдеться про систему штрафів за перевищення встановлених квот на ризик у регіоні. Щоб зацікавити підприємства у зменшенні величини ризику, необхідно створити спеціальні регіональні фонди та передбачити виплату премій за зниження ризику.

Третя група механізмів вимагає заміни і вдосконалення технічної бази, відновлення обладнання, впровадження нових технологій та інформаційних систем.

Четверта група покликана розширити ринок кваліфікованих кадрів і реорганізувати систему перепідготовки працівників.

П'ята група механізмів спрямована на стимулювання інвестицій, які запобігали б збиткам, за допомогою податкової політики.

Розв'язання даної проблеми залежить, передусім, від поліпшення економічної ситуації в державі.

Першочерговими завданнями, що існують в економічній проблемі екологічної безпеки на зруйнованих територіях, на наш погляд, є:

- розроблення методів визначення економічних наслідків військових дій;

- розроблення ефективних економічних механізмів відповідальності та стимулювання підвищення рівня промислової безпеки на зруйнованих територіях;

- створення цілісної системи методик і нормативних документів, що мають регламентувати економічні наслідки військових дій.

Ефективна система державного управління, на наш погляд, має створити належні умови для вкладення достатніх інвестицій на реалізацію природоохоронних заходів, спрямованих на зменшення загроз наслідків військових дій.

2.2. Організаційно-управлінські механізми забезпечення екологічної безпеки.

До реалізації заходів, спрямованих на досягнення, підтримку і контроль за дотриманням вимог екологічної безпеки, мають залучатися різні міністерства, відомства, установи й організації держави. Державна система екологічної безпеки України – це сукупність державних заходів (правових, економічних, технічних, гуманітарних і медичних), спрямованих на підтримку рівноваги між її екосистемами та антропогенними й природними навантаженнями. Організаційна структура даної системи має формуватися із органів управління, сил і засобів, що забезпечують її функціонування.

Серед першочергових організаційно-управлінських проблем техногенної безпеки на зруйнованих територіях можна виділити такі:

- розроблення національної політики та законодавчої бази у цій сфері;

- створення цілісної системи державного управління безпекою;

- посилення контрольних функцій з боку держави за дотриманням техногенної безпеки;

- створення системи державних резервів;

- впровадження нової системи навчання та атестації фахівців у сфері промислово-природної безпеки.

2.3. Механізми нормування якості навколишнього середовища в напрямку забезпечення екологічної безпеки.

Нормування якості навколишнього природного середовища на територіях бойових дій доцільне проводити з метою встановлення гранично допустимих норм впливу на навколишнє природне середовище, що гарантує екологічну безпеку населення та збереження генетичного фонду, забезпечення раціонального використання та відтворення природних ресурсів в умовах стійкого розвитку господарської діяльності держави. Нормативи гранично допустимих шкідливих впливів, а також методи їх визначення необхідно визначити спеціально уповноваженими на це державними органами України.

З урахуванням природно-кліматичних особливостей, а також підвищеної соціальної цінності окремих територій (заповідників, заказників, національних парків, курортних і рекреаційних зон) для них необхідно використовувати більш жорсткіші нормативи гранично допустимих шкідливих впливів на довкілля. Система екологічного нормування має охопити всі фактори екологічних ризиків, пов'язаних із розміщенням, будівництвом та експлуатацією промислових об'єктів та комплексів зі створенням нової техніки, технологій та матеріалів.

Головні механізми забезпечення державної системи екологічної безпеки зруйнованих територій:

- організація, управління та контроль за дотриманням вимог екологічної безпеки на зруйнованих територіях;

- планування та координація комплексних програм охорони довкілля та раціонального природокористування;

– контроль за дотриманням єдиної державної політики, що гарантує надійність і стійке функціонування народногосподарських об'єктів безпеки;

– запобігання та ліквідація екологічних наслідків промислових аварій, природних катастроф і стихійних лих;

– оцінка стану екологічної безпеки на всій території України і в окремих її адміністративно-територіальних утвореннях, прогнозування її динаміки.

2.4. Технологія впровадження механізмів забезпечення екологічної безпеки зруйнованих територій.

Забезпечення законодавчої бази з питань ліквідації наслідків бойових дій передбачає наступні заходи:

розроблення науково-обґрунтованих екологічних нормативів та узгодження їх з існуючими законодавчими актами;

внесення відповідних змін і доповнень до адміністративного та кримінального Кодексів України;

запровадження системи економічно-відчутних штрафних санкцій за порушення норм природоохористування;

розроблення відповідних підзаконних актів до Закону України «Про охорону навколишнього природного середовища»;

забезпечення дотримання законів щодо охорони навколишнього природного середовища;

розроблення механізмів економічного стимулювання екологічної діяльності, які дозволили б забезпечити необхідний баланс екологічних та економічних інтересів;

прийняття додаткових заходів з удосконалення кримінальної відповідальності за екологічні злочини, передбачаючи при цьому відповідальність за найбільш небезпечні види посягань на навколишнє середовище та окремі її елементи, узгоджуючи при цьому зміст кримінально-правових норм з базовим екологічним законодавством.

3. Наукові аспекти забезпечення екологічної безпеки під час ліквідації наслідків військових дій, екологічному відродженню та розвитку України.

Систему управління екологічною безпекою під час ліквідації наслідків військових дій, екологічному відновленню та розвитку України неможливо побудувати без знань фундаментальних наукових законів впливу шкідливих антропогенних чинників на екосистеми, а також діяльність людини. Використовуючи аерокосмічні технології та системи штучного інтелекту, можна завчасно спрогнозувати зміни стану природного середовища та передбачити небажані наслідки таких змін, завчасно запобігти їх. Отже, на передньому плані – опрацювання цілої низки першочергових теоретичних задач екологічного нормування антропогенних навантажень, зокрема, серед них:

1. Визначення теоретичних основ формування нооценозів – фундаментальна проблема сучас-

ної науки та стратегічний напрямок забезпечення екологічної безпеки суспільства. Першочергове завдання – означення критеріїв екологічної безпеки (ноосферосумісного) розвитку виробничих сил та опрацювання на цій основі системи екологічних нормативів.

2. Опрацювання наукових основ екологічного нормування антропогенних навантажень на природні системи України та розв'язання протиріч, що виникають при взаємодії природи і людини.

3. Окреслення допустимих меж показників динаміки екологічних систем різного рангу, перевищення яких свідчить про наближення до критичного стану. При цьому вибір масштабу величин таких показників залежить від конкретних обставин, проте правилом тут має бути мінімізація ризику катастрофічної зміни екологічної системи.

Можна знайти досить ефективні системні рішення завдяки розробці й впровадженню наукових основ державної політики, що функціонують під час розв'язання державних, регіональних, галузевих науково-технічних проблем.

Серед першочергових завдань науково-технічної проблеми екологічної безпеки на зруйнованих територіях означені такі:

– створення реальних наукових основ забезпечення промислової безпеки, безпеки складних технічних систем, людей і довкілля;

– розроблення методів оцінки небезпеки промислових об'єктів;

– розроблення наукових засад концепції прийнятого ризику щодо умов функціонування техногенних систем;

– створення банку даних та системи моніторингу техногенної безпеки;

– прогнозування оцінок і сценаріїв розвитку природних змін в екосистемі на зруйнованих територіях та ефективних заходів реагування;

– соціально-економічні, нормативно-правові та організаційні заходи для стійкого розвитку регіонів в умовах переходу до ринкових відносин з урахуванням загроз, що мають техногенне, стихійне або техногенно-стихійне походження;

– розроблення математичних моделей зменшення потенційних загроз промислових об'єктів для розв'язання широкого кола оптимізаційних завдань, пов'язаних зі зниженням загроз для населення.

Екологічне відновлення та розвиток держави вимагає комплексного вирішення гуманітарних питань:

– формування уявлення про «екологічний імператив військових дій» – заборонену межу, переступати яку людство не має права за жодних обставин;

– екологічне вихованням (усвідомлення та розуміння дії екологічних законів, формування принципів співіснування різних об'єктів природи між собою та людиною внаслідок бойових дій; організації, управління, використання природи та її ресурсів

для забезпечення життєдіяльності людини на принципах функціонування «ноосфери»);

– екологічна свідомість та екологічне мислення (відображення не тільки діяльності щодо захисту природи, але й ставлення до неї, до умов, в яких вона знаходиться).

Висновки.

Підбиваючи підсумок, варто зазначити, що проблема повоєнного екологічного відновлення та розвитку України потребує системного розв'язання. Екологічна безпека спрямована на усунення екологічних загроз, що проявляються в локальних, регіональних і глобальних масштабах (екологічні стихії, соціальні кризи та техногенні катастрофи). Отже, забезпечення екологічної безпеки на зруйнованих територіях – основний спосіб розв'язання екологічних проблем, що гарантує громадянам України належний розвиток та проживання. Окрім того, результати проведених окремих досліджень проблем антропогенного впливу на природне середовище в зоні бойових дій дозволяють висловити низку узагальнених положень. Проблеми антропогенного впливу на природне довкілля в зоні бойових дій об'єктивно вимагають системної екологізації суспільно-політичної думки, поглиблення уваги до розв'язання природоохоронних проблем на всіх рівнях організації суспільства, пошуку новітніх підходів їхнього розв'язання на основі пріоритету екологічних законів та наукових знань. Рівень національної безпеки, що склався на зруйнованих територіях визначається величиною ризику як від техногенних катастроф, так і в негативних процесів наслідків бойових дій, що призводять до соціальної напруги (екологічні проблеми, соціальні конфлікти тощо). В реалізації заходів, спрямованих на досягнення, підтримку та контроль за дотриманням вимог екологічної безпеки на зруйнованих територіях, цілком зрозуміло, мають брати участь різні міністерства, відомства, установи та організації України. Реальний результат від вжиття таких заходів можна отримати тільки за комплексного застосування, що потребує, у свою чергу, впровадження чітко відпрацьованого механізму інформаційного, організаційного, оперативного управління діяльністю всіх суб'єктів цього процесу. Для реалізації такого меха-

нізму також має бути сформована система управління екологічною безпекою на зруйнованих територіях із застосуванням аерокосмічних технологій та систем штучного інтелекту. Створення системи управління екологічною безпекою за своєю пріоритетністю має розглядатися на рівні забезпечення національної безпеки України. Системним стратегічним напрямом охорони довкілля та збереження природних ресурсів на зруйнованих територіях має стати подолання ресурсного марнотратства, низького рівня використання як первинної, так та і вторсировини відходів до повторної переробки, впровадження мало- та безвідходних технологій. Перебудова промислового та аграрного комплексів на зруйнованих територіях (ситуаційне управління) має здійснюватися на сучасних, а краще – за перспективними технологіями. Реформування економіки має враховувати необхідність поліпшення виробництва, обладнання для розвитку нетрадиційної енергетики, зростання ролі та можливостей використання зарубіжного й вітчизняного досвідів підвищення рівня екобезпеки на інфраструктурних об'єктах, досягнення реальної паливно-енергетичної незалежності України. Отже, розв'язання проблем забезпечення екологічної безпеки на зруйнованих територіях внаслідок військових дій, екологічного відновлення та розвитку України вимагають комплексного врахування економічних, інженерних, соціальних та інших факторів загальнолюдських цінностей. Тільки завдяки системному підходу в організації державного управління можна якнайшвидше усунути наслідки бойових дій (оперативне управління) на зруйнованих територіях та поступово і послідовно забезпечити сталий розвиток регіонів. Здійснити організацію природокористування на зруйнованих бойовими діями територіях у відповідності до вимог екологічної безпеки, на жаль, в нинішніх економічних умовах є віддаленою перспективою, але на сьогодні життєво важливо забезпечити системний поступальний і цілеспрямований розвиток у даному напрямку шляхом реалізації запропонованих системних механізмів інформаційного, організаційного та оперативного управління із застосуванням аерокосмічних технологій та систем штучного інтелекту.

Література

1. Бондар О. І., Машков О. А., Міхеев В. С. Системний підхід щодо створення системи підтримки екологічних рішень для забезпечення екологічної безпеки держави. *Екологічні науки: науково-практичний журнал*. 2020. № 3(30). С. 30-38.
2. Бущенко А.П. На межі виживання: знищення довкілля під час збройного конфлікту на Сході України. *Укр. Гельсінська спілка прав людини*. К.: КИТ, 2017. 88 с.
3. Гончарук О. Б., Савичук Н. О. Поняття механізмів державного управління та їх практичне значення. *Інвестиції: практика та досвід*. 2021. № 7. С. 77-83.
4. URL: DOI: 10.32702/2306-6814.2021.7.77.
5. Денісов Н., Аверін Д. Оцінка екологічної шкоди та пріоритети відновлення довкілля на сході України. К.: ВАІТЕ, 2017. 88 с.
6. Іванюта С.П. Пріоритетні напрями протидії екологічним і техногенним загрозам в зоні військового конфлікту на Сході України. 2019.URL: <https://niss.gov.ua/en/node/137>.

7. Івашова Л.М., Івашов М.Ф., Квеліашвілі І.М. Методологія наукових досліджень і системного підходу у сфері публічного управління: механізми, важелі, методи, інструменти. *Публічне управління та митне адміністрування*. 2020. № 2 (25), С. 11-19.
8. Засядько Є. Місяць війни. Злочини проти довкілля. 2022. URL:<https://www.epravda.com.ua/rus/columns/2022/03/26/684714/>
9. Настасенко О.Г., Бондар О.І., Машков О.А. Системний підхід щодо ліквідації загроз екологічної катастрофи у зоні антитерористичної операції. *Науково-практичний журнал «Екологічні науки»*. 2014. № 1(6). С. 5-20.
10. Половцев О. Системний підхід до прийняття рішень в державному управлінні: Методологія розв'язання задач державного управління та прийняття об'єктивних рішень з визначеною якістю. 2021. (Ukrainian Edition) Paperback – September 30. 212 с.
11. Омельчук Оксана, Садогурська Софія. Природа та війна: як військове вторгнення Росії впливає на довкілля України. 2022. URL:<https://ecoaction.org.ua/pryroda-ta-vijna.html>
12. Хилько М. І. Екологічна безпека як фундаментальна складова національної безпеки. (2021). *Вісник Донецького національного університету імені Василя Стуса. Сер. Політичні науки*. 2021. С. 69-75.

Дата першого надходження статті до видання: 30.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИРОДООХОРОННИХ ЗАХОДІВ НА АВТОЗАПРАВНИХ СТАНЦІЯХ

Бойко В.М.

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

пр. Любомира Гузара, 1, Київ, 03680

3998111@stud.kai.edu.ua

У статті досліджено проблематику оцінювання ефективності природоохоронних заходів на автозаправних станціях як об'єктах підвищеної екологічної безпеки. Обґрунтовано актуальність впровадження сучасних підходів до мінімізації негативного впливу на атмосферне повітря, ґрунти та підземні води, що зумовлено зростанням обсягів споживання нафтопродуктів і розширенням мережі автозаправних комплексів. Проаналізовано основні джерела забруднення довкілля на АЗС, зокрема викиди летких органічних сполук, витoki нафтопродуктів, утворення небезпечних відходів і ризики аварійних ситуацій.

У роботі розглянуто методичні підходи до оцінювання ефективності природоохоронних заходів, що базуються на визначенні концентрацій забруднювальних речовин, розрахунку індексів екологічної безпеки та аналізі відповідності нормативним вимогам. Особливу увагу приділено застосуванню кількісних показників, таких як індекс безпеки, коефіцієнти зниження викидів і рівень екологічного ризику. Узагальнено сучасні технічні та організаційні рішення, спрямовані на зниження негативного впливу АЗС, зокрема використання систем рекуперації парів пального, герметизації резервуарів, удосконалення систем контролю витоків і впровадження екологічного моніторингу.

Доведено, що комплексне застосування природоохоронних заходів у поєднанні з ефективними методами оцінювання дозволяє суттєво знизити екологічні ризики та забезпечити сталий розвиток об'єктів паливної інфраструктури. Отримані результати можуть бути використані при розробленні заходів екологічної безпеки, удосконаленні нормативної бази та підвищенні ефективності управління природоохоронною діяльністю на автозаправних станціях. *Ключові слова:* автозаправні станції, природоохоронні заходи, екологічна безпека, викиди, леткі органічні сполуки, екологічний ризик, оцінювання ефективності.

Evaluation of the effectiveness of environmental protection measures at gas stations. Boiko V.

The article addresses the issue of evaluating the effectiveness of environmental protection measures at gas stations as facilities with increased environmental risk. The relevance of implementing modern approaches to minimizing negative impacts on atmospheric air, soil, and groundwater is substantiated, considering the growing consumption of petroleum products and the expansion of gas station networks. The main sources of environmental pollution at gas stations are analyzed, including emissions of volatile organic compounds, fuel leaks, generation of hazardous waste, and risks of emergency situations.

Methodological approaches to assessing the effectiveness of environmental measures are examined, focusing on determining pollutant concentrations, calculating environmental hazard indices, and analyzing compliance with regulatory requirements. Particular attention is paid to quantitative indicators such as hazard indices, emission reduction coefficients, and environmental risk levels. Modern technical and organizational solutions aimed at reducing environmental impacts are summarized, including vapor recovery systems, tank sealing technologies, leak detection systems, and environmental monitoring implementation.

It is established that the integrated application of environmental protection measures combined with effective assessment methods significantly reduces environmental risks and contributes to the sustainable development of fuel infrastructure facilities. The obtained results can be applied in the development of environmental safety measures, improvement of regulatory frameworks, and enhancement of environmental management efficiency at gas stations. *Key words:* gas stations, environmental protection measures, environmental safety, emissions, volatile organic compounds, environmental risk, effectiveness evaluation.

Постановка проблеми. Функціонування автозаправних станцій супроводжується постійним контактом із нафтопродуктами та їх похідними, що формує локалізовані, але систематичні джерела забруднення довкілля. Найбільш уразливими компонентами природного середовища в межах таких об'єктів виступають атмосферне повітря, ґрунтовий покрив і підземні води, які зазнають впливу внаслідок випаровування пального, витоків із резервуарів

та технологічних втрат. Водночас інтенсивність експлуатації автозаправних станцій зростає, що призводить до накопичення екологічного навантаження навіть за умов дотримання базових нормативних вимог. За таких обставин виникає потреба не лише у впровадженні природоохоронних заходів, а й у їх об'єктивному оцінюванні, оскільки фактична ефективність застосованих рішень не завжди відповідає очікуваним результатам.



Актуальність дослідження. Функціонування автозаправних станцій супроводжується постійним утворенням викидів летких органічних сполук, що формуються під час зберігання та відпуску нафтопродуктів. Ці процеси мають не лише локальний характер, оскільки забруднювальні речовини здатні поширюватися у приземному шарі атмосфери, створюючи ризики для населення прилеглих територій. Дослідження показують, що концентрації таких сполук, як бензол і толуол, можуть суттєво коливатися залежно від режимів експлуатації АЗС, що ускладнює прогнозування рівня екологічного навантаження [8]. Паралельно з атмосферними викидами існує загроза забруднення ґрунтів і підземних вод унаслідок витоків пального або порушення герметичності резервуарів, що підтверджується результатами моделювання ризиків забруднення [10].

Наявні нормативні вимоги регламентують умови експлуатації автозаправних станцій і встановлюють допустимі рівні впливу на довкілля, однак їх дотримання не завжди відображає фактичну ефективність природоохоронних заходів [3; 5]. У практиці експлуатації часто виникає ситуація, коли технічні рішення впроваджені формально, але їх реальний вплив на зниження забруднення залишається недостатньо визначеним. Це створює розрив між нормативним забезпеченням і фактичним екологічним результатом.

Поглиблення цієї проблеми пов'язане з розширенням мережі автозаправних станцій та зростанням інтенсивності їх використання, що призводить до накопичення екологічного навантаження навіть за умов дотримання встановлених правил експлуатації [2]. Дослідження екологічних ризиків свідчать, що вплив АЗС не обмежується межами їх розташування і може проявлятися у зміні якості повітря та ґрунтового середовища у прилеглих житлових зонах [12]. За таких умов оцінювання ефективності природоохоронних заходів набуває значення інструменту, що дозволяє не лише фіксувати рівень забруднення, а й визначати результативність застосованих технологічних і організаційних рішень.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження спрямоване на формування підходів до оцінювання ефективності природоохоронних заходів, які враховують як екологічні показники, так і особливості функціонування автозаправних станцій. Такий підхід відповідає завданням зниження техногенного впливу на довкілля, що закріплені у національному природоохоронному законодавстві [4]. У цьому контексті авторський доробок орієнтований на уточнення критеріїв оцінювання, які дозволяють встановити реальний рівень екологічної безпеки об'єктів паливної інфраструктури.

Практична значущість роботи полягає у можливості використання отриманих результатів для вдосконалення систем екологічного контролю та

управління. Зокрема, результати можуть бути застосовані при проведенні процедур оцінки впливу на довкілля та прийнятті рішень щодо модернізації автозаправних станцій [5]. Врахування кількісних показників ефективності природоохоронних заходів створює передумови для оптимізації витрат на екологічні заходи та підвищення їх результативності. Науковий аспект дослідження пов'язаний із розвитком підходів до інтегрованого оцінювання екологічних ризиків, які враховують взаємозв'язок між джерелами забруднення, шляхами їх поширення та впливом на навколишнє середовище. Сучасні дослідження пропонують різні моделі оцінки ризиків, однак їх застосування без урахування ефективності природоохоронних заходів обмежує можливості практичного використання [9; 11]. У цьому контексті запропонований підхід дозволяє поєднати оцінку ризиків із аналізом результативності заходів, що сприяє більш обґрунтованому прийняттю управлінських рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження автозаправних станцій зосереджені переважно на оцінці складу викидів та пов'язаних із ними ризиків для здоров'я людини. Значна частина робіт присвячена летким органічним сполукам, які формуються під час технологічних операцій із паливом і характеризуються високою токсичністю та здатністю до накопичення в повітрі [3; 8]. Емпіричні дослідження підтверджують, що концентрації таких сполук можуть істотно варіювати залежно від типу пального, інтенсивності обслуговування та конструктивних особливостей станції [8]. Паралельно розвивається напрям оцінки ризиків, у межах якого використовуються індекси небезпеки та моделі прогнозування впливу на персонал і населення [6; 7]. Окремі праці демонструють можливість застосування математичних моделей і машинного навчання для прогнозування забруднення ґрунтів і підземних вод [10]. Разом із тим більшість досліджень орієнтована на фіксацію рівнів забруднення або оцінку ризиків, тоді як питання результативності конкретних природоохоронних заходів розглядається епізодично [9; 11].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Наявні наукові підходи не формують цілісного уявлення про те, наскільки впроваджені природоохоронні заходи реально змінюють екологічний стан. Переважає оцінювання фактичних концентрацій забруднювальних речовин без аналізу їх динаміки після впровадження технічних рішень. У результаті складно визначити, які заходи є дійсно ефективними, а які лише формально відповідають нормативним вимогам. Недостатньо опрацьованим залишається питання поєднання екологічних показників із характеристиками експлуатації об'єкта, що обмежує можливість обґрунтованого вибору природоохоронних технологій.

Новизна. Новизна дослідження полягає у переході від фіксації рівнів забруднення до аналізу змін, спричинених впровадженням природоохоронних заходів. Запропоновано розглядати ефективність як динамічний показник, що відображає взаємодію технічних рішень, умов експлуатації та екологічних параметрів. Такий підхід дозволяє оцінювати не лише наявність впливу, а й ступінь його зменшення.

Методологічне або загальнонаукове значення. Результати дослідження розширюють підходи до оцінювання техногенного впливу, оскільки поєднують аналіз ризиків із оцінкою ефективності природоохоронних заходів. Це створює основу для розроблення універсальних методик, які можуть застосовуватися не лише для автозаправних станцій, а й для інших об'єктів із подібною структурою впливу на довкілля. Крім того, інтеграція кількісних показників і характеристик експлуатації дозволяє підвищити обґрунтованість управлінських рішень у сфері екологічної безпеки.

Виклад основного матеріалу. Оцінювання ефективності природоохоронних заходів на автозаправних станціях потребує системного підходу, що враховує як обсяги утворення забруднювальних речовин, так і специфіку функціонування об'єкта. Особливість таких об'єктів полягає у поєднанні кількох джерел впливу, серед яких домінують випаровування пального під час його зберігання, втрати при відпуску, а також потенційні витіки з резервуарів і технологічного обладнання. Унаслідок цього формується сукупний викид, який доцільно розглядати як суму внесків окремих джерел:

$$E_{\text{зар}} = \sum_{i=1}^n E_i \quad (1)$$

де E_i – викид від i -го джерела, т/рік.

Такий підхід дозволяє деталізувати структуру впливу і визначити, які саме процеси формують основне екологічне навантаження.

Подальший аналіз передбачає оцінювання концентрацій забруднювальних речовин у повітрі, що відображає фактичний рівень впливу на навколишнє середовище. Концентрація залежить не лише від обсягу викидів, але й від умов їх розсіювання, що у спрощеному вигляді може бути подано як відношення маси викиду до об'єму повітря та часу поширення:

$$C = \frac{E}{V \cdot t} \quad (2)$$

де C – концентрація, мг/м³;

E – маса викиду, мг;

V – об'єм повітря, м³;

t – час розсіювання, с.

Однак абсолютні значення концентрацій не дають повного уявлення про рівень небезпеки, тому доцільним є їх співставлення з нормативними величинами. Для цього використовується коефіцієнт перевищення:

$$K_i = \frac{C_i}{ГДК_i} \quad (3)$$

де K_i – коефіцієнт перевищення;

$ГДК_i$ – гранично допустима концентрація i -ї речовини,

який дозволяє оцінити ступінь відхилення від допустимого рівня. У випадку одночасної присутності кількох речовин сумарний вплив визначається через інтегральний показник:

$$Z = \sum_{i=1}^n K_i \quad (4)$$

що відображає комбінований ефект забруднення. Перевищення одиниці свідчить про формування несприятливих умов у приземному шарі атмосфери.

Більш глибоке розуміння впливу забезпечує оцінка екологічного ризику, яка враховує не лише концентрації, але й токсикологічні характеристики речовин:

$$HI = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{RfC_i} \quad (5)$$

де E_0 – викиди до впровадження заходів;

E_1 – після впровадження.

Отриманий індекс небезпеки дозволяє оцінити потенційний вплив на здоров'я людини. Його зростання вказує на накопичення ризиків навіть у випадках, коли окремі концентрації не перевищують нормативних значень.

Оцінювання ефективності природоохоронних заходів базується на порівнянні показників до та після їх впровадження. Зміна обсягів викидів може бути виражена через відносний показник:

$$\eta = \frac{E_0 - E_1}{E_0} \cdot 100\% \quad (6)$$

який відображає частку зниження забруднення. Аналогічний підхід застосовується до концентрацій:

$$\eta_c = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \cdot 100\% \quad (7)$$

Однак ізольоване використання таких показників не дозволяє врахувати комплексний характер впливу, тому виникає потреба в інтегральній оцінці. Узагальнений показник ефективності може бути поданий у вигляді:

$$E_{\text{комп}} = \alpha \cdot \eta + \beta \cdot \left(1 - \frac{Z_1}{Z_0}\right) \quad (8)$$

де вагові коефіцієнти відображають значущість окремих складових. Такий підхід дозволяє врахувати не лише зниження викидів, але й зміну загального екологічного стану.

Суттєвий вплив на отримані результати мають умови експлуатації автозаправної станції. Інтенсивність використання об'єкта визначає масштаби утворення забруднень, що може бути виражено

через відношення фактичного обсягу реалізації пального до максимально можливого:

$$E_{\text{експл}} = \frac{Q}{Q_{\text{max}}} \quad (9)$$

де Q – фактичний обсяг реалізації пального.

Зростання цього показника призводить до підвищення навантаження на природоохоронні системи, що може знижувати їх ефективність навіть за незмінних технічних характеристик.

Порівняльний аналіз показує, що найбільш результативними є заходи, спрямовані на запобігання утворенню забруднень, оскільки вони впливають на сам механізм їх формування. Зокрема, системи рекуперації парів пального дозволяють зменшити викиди ще на етапі їх виникнення, тоді як контрольні заходи лише фіксують уже сформовані концентрації. Така відмінність пояснює різну ефективність технологічних рішень навіть за однакових умов експлуатації.

Узагальнюючи викладене, можна зазначити, що оцінювання ефективності природоохоронних заходів повинно базуватися на поєднанні кількісних показників забруднення, характеристик ризику та умов функціонування об'єкта. Лише комплексний підхід дозволяє встановити причинно-наслідкові зв'язки між впровадженими заходами та змінами екологічного стану, що є основою для обґрунтованого прийняття управлінських рішень.

Головні висновки. Проведений аналіз показує, що автозаправні станції формують складну структуру техногенного впливу, в якій поєднуються процеси випаровування пального, витіки та вторинне забруднення ґрунтів і водного середовища. Така багатокomпонентність ускладнює оцінювання екологічного стану, оскільки окремі показники не відображають повної картини впливу. Використання сукупності індикаторів, зокрема концентрацій забруднювальних речовин, коефіцієнтів перевищення та інтегральних показників, дозволяє більш об'єктивно характеризувати рівень екологічного навантаження.

Встановлено, що ефективність природоохоронних заходів не може розглядатися як стала величина, оскільки вона залежить від умов експлуатації, технічного стану обладнання та інтенсивності функціонування об'єкта. Навіть за однакових технологічних рішень можливі суттєві відмінності у рівнях викидів, що свідчить про необхідність урахування експлуатаційних факторів під час оцінювання результативності заходів.

Аналіз показав, що найбільш відчутне зниження екологічного навантаження забезпечують заходи, спрямовані на запобігання утворенню забруднень, а не їх подальше контролювання. Такий ефект пояс-

нюється тим, що усунення джерела втрат на ранніх етапах технологічного процесу зменшує загальний обсяг викидів, тоді як контрольні механізми лише фіксують уже наявні концентрації.

Запропонований підхід до оцінювання, який поєднує показники забруднення, індекси ризику та характеристики функціонування автозаправних станцій, дозволяє перейти від фіксації стану довкілля до аналізу причин його змін. Це створює можливість встановлення прямого зв'язку між впровадженими природоохоронними заходами та їх фактичною ефективністю.

Отримані результати свідчать, що комплексне оцінювання є більш інформативним порівняно з використанням окремих показників, оскільки дозволяє виявити приховані закономірності впливу та визначити напрями підвищення ефективності природоохоронної діяльності на автозаправних станціях.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати можуть бути застосовані при вдосконаленні підходів до екологічного управління автозаправними станціями, зокрема під час обґрунтування доцільності впровадження окремих природоохоронних заходів. Запропонована методика дозволяє перейти від формального дотримання нормативних вимог до оцінювання реального екологічного ефекту, що створює підґрунтя для більш раціонального розподілу ресурсів у сфері природоохоронної діяльності.

Практичне використання результатів можливе у процесі проведення оцінки впливу на довкілля та екологічного аудиту, де виникає потреба у кількісному визначенні результативності технічних і організаційних рішень. Застосування інтегральних показників ефективності дозволяє порівнювати альтернативні варіанти модернізації автозаправних станцій і визначати найбільш доцільні з них з урахуванням умов експлуатації.

Окремий напрям використання пов'язаний із розробленням систем моніторингу, у межах яких запропоновані показники можуть бути інтегровані у цифрові інструменти контролю стану довкілля. Це відкриває можливість оперативного виявлення змін у рівнях забруднення та своєчасного коригування природоохоронних заходів.

Подальший розвиток дослідження може бути пов'язаний із розширенням методики за рахунок урахування економічних параметрів, що дозволить оцінювати ефективність природоохоронних заходів не лише з екологічної, а й з економічної точки зору. Крім того, перспективним є застосування методів моделювання та аналізу великих даних для прогнозування змін екологічного стану залежно від режимів функціонування автозаправних станцій.

Література

1. Про затвердження Інструкції щодо вимог пожежної безпеки під час проектування автозаправних станцій : наказ МНС України від 06.12.2005 № 376. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0291-06> (дата звернення: 23.03.2026).
2. Про затвердження Правил роздрібної торгівлі нафтопродуктами : постанова Кабінету Міністрів України від 20.12.1997 № 1442. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1442-97-п> (дата звернення: 23.03.2026).
3. Про охорону атмосферного повітря : Закон України від 16.10.1992 № 2707-XII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2707-12> (дата звернення: 23.03.2026).
4. Про охорону навколишнього природного середовища : Закон України від 25.06.1991 № 1264-XII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12> (дата звернення: 23.03.2026).
5. Про оцінку впливу на довкілля : Закон України від 23.05.2017 № 2059-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19> (дата звернення: 23.03.2026).
6. Altuwair I. A. Risk Assessment of Gas Station. *Journal of Chemical and Chemical Engineering*. 2025. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2025JClCh.11...15I/abstract> (дата звернення: 23.03.2026).
7. Chaiklieng S., Tongsantia U., Suggaravetsiri P., Autrup H. Assessment of Exposure to Benzene Among Gasoline Station Workers in Thailand: Risk Assessment Matrix Methods. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2025. Vol. 22. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph22030397>
8. Heidari E. A., Sarkhosh M., Alidadi H. та ін. Assessing VOC emissions from different gas stations: impacts, variations and modeling fluctuations of air pollutants. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-67542-4>
9. Karaim V. P., Bakaraiev O. A., Karaim O. A., Lavrynyuk Z. V. Gas station emissions: risk assessment in the context of ensuring sustainable development. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2025. № 44. URL: https://www.researchgate.net/publication/399572383_Gas_station_emissions_risk_assessment_in_the_context_of_ensuring_sustainable_development (дата звернення: 23.03.2026).
10. Karaim O. A., Bakaraiev O. A., Karaim V. P., Lavrynyuk Z. V. Predicting potential soil and groundwater contamination risks from gas stations using machine learning models. 2025. URL: https://www.researchgate.net/publication/391377258_Predicting_Potential_Soil_and_Groundwater_Contamination_Risks_from_Gas_Stations_Using_Three_Machine_Learning_Models_XGBoost_LightGBM_and_Random_Forest (дата звернення: 23.03.2026).
11. Mafi-Gholami D., Aleali H. A Novel Framework for Comprehensive Risk Assessment of Fuel Stations: Integrating Exposure and Adaptive Capacity for Sustainable Operations. *Advances in Standards & Applied Sciences*. 2025. DOI: 10.22034/ASAS.2025.493012.1067
12. Muller N. V. Assessment of residential area environmental pollution from gas stations. *Zhishchynoe Stroitelstvo*. 2025. № 12. URL: https://www.researchgate.net/publication/399864717_Assessment_of_residential_area_environmental_pollution_from_gas_stations (дата звернення: 23.03.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 26.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

ІНЖЕНЕРНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІРОГЕННОЇ СТІЙКОСТІ ТА ЕКОЛОГІЧНА СТАБІЛІЗАЦІЯ ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМ У ЗОНАХ ІНТЕНСИВНОГО ТЕХНОГЕНЕЗУ

Дичко А.О.¹, Демчук Л.І.², Крюковська Л.І.¹, Кагукіна А.М.², Бельмега І.В.²

¹Національного транспортного університету

вул. °М. °Омеляновича-Павленка, 1, 01010, м. Київ

²Державний університет «Житомирська політехніка»

вул. Чуднівська 103, 10005, м. Житомир

aodi@ukr.net; krjukovska@gmail.com, ke_dlm@ztu.edu.ua; ke_kham@ztu.edu.ua

У роботі розглядається комплексна проблема збереження та відновлення лісових екосистем, що функціонують в умовах надмірного антропогенного навантаження та високого ризику виникнення пожеж. Зони інтенсивного техногенезу (райони видобутку копалин, металургійні центри, зони впливу ТЕС та великих транспортних вузлів) характеризуються деградацією природного середовища, що суттєво знижує природну резистентність лісів до вогню. Наукова новизна та актуальність дослідження зумовлені необхідністю переходу від пасивного спостереження до активного інженерного керування станом лісових масивів. Автор обґрунтовує, що в умовах техногенезу ліси втрачають здатність до саморегуляції через зміну хімічного складу ґрунтів, порушення гідрологічного режиму та акумуляцію сухих органічних решток. Це перетворює лісові масиви на об'єкти підвищеної пожежної небезпеки.

Інженерна складова роботи включає розробку та впровадження системи технічних заходів у проєктуванні інтелектуальних систем раннього виявлення осередків займання на основі мереж сенсорів та ГІС-технологій, а також у створенні мінералізованих смуг нового типу та розробка схем розміщення протипожежних розривів із використанням інженерних споруд.

Екологічна стабілізація розглядається як процес фіторекультивациї та оптимізації видового складу. Запропоновано методу формування «пірогенних буферів» – смуг із вогнестійких листяних порід, які здатні витримувати високий рівень загазованості та техногенного пилу. Особливу увагу приділено механізмам зниження горючості лісової підстилки шляхом регулювання мікробіологічних процесів розкладу опадів в умовах забруднення важкими металами.

Практична значущість результатів полягає у створенні алгоритму прийняття рішень для лісотехнічних господарств, що працюють у промислових регіонах. Запропоновані заходи дозволяють не лише знизити ймовірність переходу низових пожеж у верхові на 30-40%, а й забезпечити довгострокову екологічну стійкість екосистем до техногенного пресингу. Очікуваним результатом є створення керованого лісового ландшафту, де інженерні споруди та біологічні фактори працюють як єдина система захисту довкілля. *Ключові слова:* пірогенна стійкість, техногенез, екологічна стабілізація, лісові екосистеми, екологічний ризик, управління ризиками, катастрофа, протипожежна інженерія, моніторинг, фіторекультивация.

Engineering support of pyrogenic resistance and ecological stabilization of forest ecosystems in areas of intensive technogenesis.
Dychko A., Demchuk L., Kryukivska L., Kagukina A., Belmega I.

The work considers the complex problem of preservation and restoration of forest ecosystems functioning in conditions of excessive anthropogenic load and high risk of fires. Zones of intensive technogenesis (areas of mineral extraction, metallurgical centers, zones of influence of thermal power plants and large transport hubs) are characterized by degradation of the natural environment, which significantly reduces the natural resistance of forests to fire. The scientific novelty and relevance of the research are determined by the need to transition from passive observation to active engineering management of the state of forest areas. The author substantiates that in the conditions of technogenesis, forests lose their ability to self-regulate due to changes in the chemical composition of soils, disruption of the hydrological regime, and the accumulation of dry organic residues. This turns forest areas into objects of increased fire danger.

The engineering component of the work includes the development and implementation of a system of technical measures in the design of intelligent systems for the early detection of ignition sources based on sensor networks and GIS technologies, as well as in the creation of mineralized strips of a new type and the development of schemes for the placement of fire breaks using engineering structures.

Ecological stabilization is considered as a process of phytoremediation and optimization of species composition. A method of forming «pyrogenic buffers» – strips of fire-resistant hardwoods that can withstand a high level of gasification and man-made dust – is proposed. Special attention is paid to the mechanisms of reducing the flammability of forest litter by regulating the microbiological processes of precipitation decomposition in conditions of heavy metal pollution.

The practical significance of the results lies in the creation of a decision-making algorithm for forestry enterprises operating in industrial regions. The proposed measures make it possible not only to reduce the probability of the transition of lowland fires to the upper reaches by 30-40%, but also to ensure the long-term ecological stability of ecosystems to man-made pressing. The expected result is the creation of a managed forest landscape where engineering and biological factors work as a single system of environmental protection. *Key words:* pyrogenic stability, technogenesis, ecological stabilization, forest ecosystems, ecological risk, risk management, disaster, fire engineering, monitoring, phytoremediation.



Постановка проблеми. У сучасному світі лісові екосистеми в зонах інтенсивного техногенезу (промислові агломерації, видобувні регіони) опиняються під подвійним тиском: хронічним хімічним забрудненням та зміною гідротермічного режиму територій. Це призводить до накопичення мертвої органіки та зниження вологості підстилки, що критично підвищує пожежну небезпеку. Проблема полягає у відсутності єдиної інженерно-екологічної стратегії, яка б поєднувала технічні засоби пожежогасіння з методами біологічної стабілізації ослаблених насаджень.

Актуальність дослідження. Зростання частоти екстремальних погодних явищ у поєднанні з антропогенним навантаженням робить традиційні методи лісоохорони недостатніми. Для зон техногенезу характерні «техногенні пустелі» та сухі захаращені масиви, де будь-яке займання за лічені хвилини перетворюється на верхову пожежу. Розробка інженерних рішень для створення пірогенно стійких ландшафтів є питанням не лише екологічної, а й національної безпеки, враховуючи близькість таких лісів до стратегічних об'єктів інфраструктури.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Робота виконується в межах державних програм із рекультивації промислових територій та стратегії адаптації лісового господарства до змін клімату. Дослідження безпосередньо корелює з завданнями ДСНС та Міністерства захисту довкілля щодо створення автоматизованих систем моніторингу та протипожежних бар'єрів у промислових зонах.

Отже, авторська праця забезпечує сполучення наукової новизни з реальними практичними засобами, які спрямовані на мінімізацію масштабів лісових пожеж та зменшення їх негативних екологічних і економічних наслідків.

Аналіз наукових публікацій за період 2021–2026 років демонструє стрімку трансформацію методів дослідження та фокус на розв'язанні глобальних криз. За останні 5 років (2020–2025) дослідження в галузі лісової пірології та техногенної екології змістилися від простого гасіння пожеж до превентивного інженерного моделювання та використання ГІС-технологій.

Зібцев С.В., Сошенський О.М. та ін. (2020-2023) у своїй праці обґрунтували перехід від стратегії «боротьби з вогнем» до управління паливними матеріалами. Розроблено моделі оцінки пожежної небезпеки для лісів, що межують із промисловими зонами [1]. Останні роботи (наприклад, школи С. Зібцева) наголошують, що в зонах техногенезу неможливо уникнути джерела вогню, тому інженерне рішення полягає у розриві вертикальної структури лісу.

Бондарь О.І., Гуменюк В.В. (2021) у дослідженні «Екологічна стабілізація лісових екосистем у зонах впливу промислових агломерацій» було доведено вплив емісій металургійних підприємств на горю-

чість хвої., яка накопичує пил на кронах та змінює температуру займання біомаси [2, 11].

Автори (Ворон В.П., Коваль І.М.) пропонують методику реструктуризації лісів шляхом створення змішаних насаджень із газостійких та вогнетривких порід як інженерного бар'єру [3]. Myroniuk V., Vasylyshyn R. протягом 2021–2024 рр. використовували супутникові дані Sentinel-2 для картографування індексу сухості (NDMI) у зонах техногенезу для прогнозування «гарячих точок» [4]. Лавров В.В., Блінкова О. І. (2023) авторами було розроблено математичні моделі деградації лісів під впливом техногенезу, що призводить до критичного накопичення сухоостою (палива) [5]. Стаття авторів [6] присвячена комплексному аналізу факторів, що спричиняють лісові пожежі в Україні в сучасних умовах. Це наукове обґрунтування того, що система пожежної безпеки лісів України потребує докорінного реформування, оскільки старі методи не враховують синергетичний ефект кліматичної кризи та наслідків повномасштабної війни [6]. У статті авторів (Кірейцева Г., Демчук Л., Палій О., Кагукіна А.) досліджують, як бойові дії спричиняють викиди небезпечних речовин у повітря, ґрунти та воду через вибухи боєприпасів, пожежі на промислових об'єктах та руйнування критичної інфраструктури [7].

Проте більшість праць фокусується або суто на гасінні пожеж, або на ботанічній рекультивації. Питання інженерного конструювання стійких екосистем (поєднання меліорації, ГІС-моніторингу та ландшафтно-інженерії) залишається фрагментарно вивченим.

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

Досі не розроблено диференційованих нормативів створення протипожежних розривів саме для зон техногенного впливу, де швидкість поширення вогню вища через дефіцит вологи. Також відсутні моделі оцінки «пірогенного ризику», які б враховували фактор хімічного забруднення хвої та листя як стимулятора горіння.

Новизна полягає у обґрунтуванні концепції «керованої пірогенної стійкості», що базується на активному втручанні в структуру ландшафту, розробці моделі гідродинамічного бар'єру для лісів у зонах техногенезу та встановленні залежності між рівнем техногенного стресу деревних порід та їхньою здатністю до займання.

Методологічне або загальнонаукове значення. Дослідження пропонує міждисциплінарний підхід, що об'єднує методи лісової пірології, інженерної гідрології та екологічного моніторингу. Це закладає теоретичну базу для створення нового класу об'єктів – інженерно-біологічних систем протипожежного захисту, які можуть бути масштабовані на інші типи антропогенно змінених територій.

Виклад основного матеріалу. Процес інженерного забезпечення пірогенної стійкості в умовах інтенсивного техногенезу розпочинається з детального районування території за ступенем пожежної небезпеки, що враховує не лише тип лісу, а й віддаленість від джерел промислової емісії. Специфіка зон техногенезу полягає у зміні фізико-хімічних властивостей лісових паливних матеріалів. Під впливом пилових викидів металургійних та цементних заводів відбувається забивання продихів хвої, що призводить до її передчасного висихання та зниження вологості на 12–15 % порівняно з фоновими показниками.

Для математичного моделювання пірогенної ситуації пропонується використовувати адаптований індекс загоряння, що враховує коефіцієнт техногенного навантаження K_p , який визначається як функція від концентрації осідаючих часток на одиницю площі крони.

Першим етапом інженерного захисту є створення гідрологічної мережі активного типу. Вона передбачає будівництво каскаду мікро-загат на тимчасових водотоках, що дозволяє підняти рівень ґрунтових вод у прилеглих масивах на 0,4–0,6 м. Це рішення створює так звані «гідрологічні буфери» – ділянки з підвищеним вмістом води в підстилці, де швидкість просування фронту вогню сповільнюється у 2,5–3 рази, перетворюючи біглу низову пожежу на стійку, яку легше локалізувати.

Другим напрямком є вертикальна структуризація деревостанів. В інженерному сенсі це означає механічне видалення «паливних містків» – нижніх гілок та підросту, що з'єднують підстилку з кронами дерев.

У зонах техногенезу цей захід є критичним, оскільки ослаблені дерева мають опущену крону. Інженерна норма передбачає обрізку сучків на висоту до 2,5 м у смугах завширшки 50 м вздовж межі з промисловими об'єктами.

Особливу увагу приділено інженерним екранам на основі геосинтетиків. Традиційні мінералізовані смуги в умовах техногенного удобрення (викиди азоту) заростають за 1-2 місяці. Застосування чорного геотекстилю з подальшою засипкою гравієм дозволяє підтримувати бар'єр у робочому стані до 10 років.

Для автоматизації контролю пропонується розгортання інтелектуальної мережі моніторингу на базі

протоколу LoRaWAN. Датчики диму та температури встановлюються на висотних об'єктах промислової інфраструктури (труби, вежі зв'язку), що забезпечує 100% покриття території.

Розрахунок ефективності розміщення таких датчиків проводиться за схемою гексагонального покриття, де радіус дії одного вузла становить 2–3 км залежно від рельєфу та густоти насаджень. Порівняння параметрів пожежної небезпеки в зонах різного техногенного впливу представлено у таб 1.

З таблиці 1. Показує, що існує дефіцит вологи ($K = 0,6$), бо техногенне навантаження (пил, теплові викиди) призводить до інтенсивного висушування лісової підстилки. Зниження вологості майже вдвічі робить ліс вразливим навіть до слабких джерел вогню. Хімічна трансформація ($K = 0,87$) відбувається із-за зниження температури займання свідчить про накопичення в хвої пилових часток та хімічних сполук, які діють як каталізатори горіння, полегшуючи спалахування. Найбільш тривожний показник ($K = 2,0$) – швидкість поширення вогню зростає вдвічі. Це означає, що час на локалізацію пожежі в техногенних зонах скорочується пропорційно. З огляду на те, що швидкість поширення вогню у техногенних зонах зростає у 2 рази ($K = 2,0$), час на успішну локалізацію пожежі силами ДСНС скорочується на 50%. У зонах впливу ТЕС/ГЗК необхідно скорочувати відстань між пожежними депо або впроваджувати автоматизовані системи відеомоніторингу з ШІ, які виявляють задимлення на етапі іскріння.

Важливою частиною екологічної стабілізації є фіто-інженерія. У зонах інтенсивного викиду SO_2 та NO_x хвойні породи замінюються на інтродуценти, такі як дуб червоний (*Quercus rubra*) або клен татарський (*Acer tataricum*). Ці види виконують функцію «живих бар'єрів». Завдяки високому вмісту солей у листі та щільній структурі крони, вони не підтримують горіння і здатні зупинити верхову пожежу, переводячи її у низову. Схема розміщення таких бар'єрів має враховувати панівну «розу вітрів» промислового регіону. Бар'єрні смуги завширшки 30–60 м розташовуються перпендикулярно до найбільш небезпечних напрямків поширення вогню.

Інженерне забезпечення також передбачає створення автономних пунктів дозаправки техніки. У зонах кар'єрів, де природні водойми часто пересохли, проектується заглиблені резервуари об'ємом 50–100 м³ з системою збору дощової води.

Таблиця 1.

Вплив техногенезу на пожежну небезпеку

Параметр	Умовно чиста зона (Контроль)	Зона впливу ТЕС/ГЗК	Коефіцієнт зміни (K)
Вологість підстилки (%)	18–22	10–14	0,6
Температура займання хвої (°C)	280	245	0,87
Швидкість поширення вогню (м/хв)	0,8	1,6	2

Економічний аспект дослідження показує, що витрати на створення інженерної інфраструктури (бар'єрів, водойм, мереж) є на 45% нижчими за прямі збитки від однієї масштабної пожежі в зоні техногенезу.

Крім того, інженерні заходи сприяють екологічній стабілізації через зменшення площі ерозії ґрунтів, яка зазвичай виникає на згарищах, що особливо небезпечно поблизу шламосховищ.

Для оптимізації управління пропонується впровадження ГІС-платформи, яка в реальному часі інтегрує дані з метеостанцій, датчиків LoRaWAN та супутникових знімків для прогнозування індексу сухості NDVI.

Це дозволяє здійснювати «точкове» зволоження найбільш небезпечних ділянок за допомогою мобільних інженерних комплексів, що значно економить водні ресурси підприємств.

Для оцінки пірогенної стійкості в зонах техногенезу ми вводимо комплексний показник інтегрального ризику займання. В умовах техногенезу вологість лісової підстилки W_{tech} знижується через депресійні лійки та теплове забруднення повітря. Вона розраховується за формулою:

$$W_{\text{tech}} = W_{\text{nat}} \cdot (1 - \alpha \cdot \log(1 + C_{\text{dust}})) - \Delta W_{\text{hyd}} \quad (1)$$

де:

W_{nat} – природна вологість підстилки (%);

α – коефіцієнт гігроскопічності техногенного пилу;

C_{dust} – концентрація промислового пилу на поверхні (mg/cm^2);

ΔW_{hyd} – дефіцит вологи, спричинений техногенним зниженням рівня ґрунтових вод.

З урахуванням інженерного стану лісу (наявності розривів та обрізки сучків), швидкість поширення вогню V (m/min) визначається як:

$$V = V_0 \cdot K_{\text{slope}} \cdot K_{\text{wind}} \cdot \prod_{i=1}^n \epsilon_i \quad (2)$$

де:

V_0 – базова швидкість горіння для даного типу лісу;

$K_{\text{slope}}, K_{\text{wind}}$ – поправки на рельєф та вітер;

ϵ_i – інженерні коефіцієнти зниження ризику:

$\epsilon_{\text{hyd}} \approx 0.4$ (при впровадженні гідротехнічних загат);

$\epsilon_{\text{str}} \approx 0.6$ (при видаленні паливних містків/обрізки сучків).

Ймовірність прориву вогню через інженерну смугу P визначається експоненціальною залежністю від ширини смуги L та її матеріалу:

$$P = \exp\left(-\frac{L \lambda_{\text{mat}}}{K_{\text{rad}}}\right) \quad (3)$$

де:

λ_{mat} – коефіцієнт вогнестійкості матеріалу (для мінералізованої смуги – 1.0, для геосинтетика – 2.5);

K_{rad} – інтенсивність теплового випромінювання фронту пожежі.

Таким чином, поєднання гідротехнічних, конструкційних та цифрових рішень формує стійкий каркас лісової екосистеми, здатної протистояти пірогенному впливу в умовах постійного техногенного пресингу.

Головні висновки. Для техногенної детермінації пожежної безпеки встановлено, що в зонах інтенсивного техногенезу швидкість поширення лісових пожеж зростає у 2.5–3 рази порівняно з природними фоновими показниками. Це зумовлено синергетичним ефектом техногенного зневоднення (депресійні лійки) та накопиченням пірогенного промислового пилу на кронах, що знижує температуру займання біомаси. Традиційні методи такі, як пріоритетність інженерних бар'єрів лісового господарства є малоефективними в умовах промислового навантаження. Доведено, що використання геосинтетичних матеріалів та інертних засипок при створенні мінералізованих смуг збільшує термін їхньої експлуатації до 10 років, нівелюючи фактор швидкого заростання бур'янами-пірофітами. Обґрунтовано гідротехнічну стабілізацію, що створення мережі штучних мікро-загат та інфільтраційних басейнів є найбільш енергоефективним методом пасивного пожежогашіння. Підтримка рівня вологості підстилки на рівні $>18\%$ дозволяє локалізувати до 70% низових займань без залучення важкої техніки. Впровадження систем моніторингу на базі LoRaWAN у радіусі до 5 км від джерел техногенезу дозволяє скоротити час виявлення осередку займання з 40–60 хвилин до 3–5 хвилин, що є критичним для запобігання переходу пожежі у верхову фазу.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати роботи мають широке прикладне значення і можуть бути імплементовані за наступними напрямками: створення спеціалізованих нормативів ДБН та ДСТУ щодо протипожежного облаштування лісів, що межують із об'єктами підвищеної безпеки (ТЕС, АЕС, хімічні комбінати); картографування ризиків; впровадження схем змішаних насаджень із використанням «зелених щитів» (листяних інтродуцентів) як обов'язкового елемента рекультивації промислових земель; перехід від витратних щорічних заходів до довгострокових інженерних споруд (водойми, стаціонарні бар'єри), що дозволяє зекономити до 40% бюджету на охорону лісу протягом 5-річного циклу; використання методів екологічної стабілізації як бази для адаптації лісів Півдня та Сходу України до умов зростаючої аридності та антропогенного тиску.

Література

1. Зібцев С. В., Сошенський О. М., Гуменюк В. В., Корець М. А. Ландшафтно-орієнтоване управління пожежами в умовах антропогенно змінених територій. Наукові праці Лісівничої академії наук України. 2021. Вип. 22. С. 45–56.
2. Бондарь О. І., Улицький О. А. Екологічна безпека лісових екосистем у зонах інтенсивного техногенезу та видобутку корисних копалин. Екологічні науки. 2022. № 3(42). С. 112–118.
3. Ворон В. П., Ткач В. П., Коваль І. М. Стійкість соснових лісів до пірогенного впливу в умовах промислового забруднення Сходу України. Лісівництво і агролісомеліорація. 2020. Вип. 136. С. 88–97.
4. Myroniuk V., Vasylyshyn R., See L. Satellite-based monitoring of fuel moisture content in technogenic forest landscapes. Remote Sensing Applications: Society and Environment. 2023. Vol. 30. Art. 100958.
5. Лавров В. В., Блінкова О. І., Іваненко О. М. Моделювання стабільності лісових біогеоценозів за умов комбінованого стресу (забруднення та вогонь). Питання степового лісознавства та лісової рекультиваци земель. 2023. № 52. С. 14–29.
6. 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 пов'язаних з воєнними діями факторів. Екологічні науки № 6(63). С. 216–220.
7. Kireitseva H., Demchuk L., Paliy O., Kahukina A. Toxic impacts of the war on Ukraine. International Journal of Environmental Studies. 2023. Vol. 80. pp. 267–276.
8. Демчук Л.І., Пацева І.Г., Алпатова О.М. Екологічний вплив бойових дій на деградацію ґрунтового покриву східних областей України. Міждисциплінарні дослідження в галузі науки, інновацій та суспільного розвитку: колек. монографія. Вип. 3. Прага, Чехія: Publishing house Education and Science s.r.o., 2026. 453 с. DOI: <https://doi.org/10.65237/3-2026-9>
9. Демчук Л.І., Пацева І.Г., Устименко В.І., Мельник-Шамрай В.В., Кагукіна А.М. Інженерно-технічні основи лісовідновлення на територіях, пошкоджених військовими діями та пірогенними факторами. Moderní aspekty vědy: LXII. Díl mezinárodní kolektivní monografie/ Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o. Česká republika: Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o., 2025. str. 475. DOI: <https://doi.org/10.52058/62-2025>
10. Пацев І.С., Нонік Л.Ю., Демчук Л.І. Екоцид лісу: відновлення після бойових дій в Україні. Сучасні вектори розвитку України: забезпечення сталості та безпеки. Збірник матеріалів II Міжнародної науково—практичної конференції (м. Київ, 28 жовтня 2024 року). Чернігів: ГО «Науково—освітній інноваційний центр суспільних трансформацій», 2024. DOI: https://doi.org/10.54929/conf_28_10_2024
11. Демчук Л. І., Нонік Л. Ю., Войналович І. М. Еколого-техногенна безпека, як роль у формуванні стратегії національної безпеки держави. Сучасні вектори розвитку України: забезпечення сталості та безпеки. Збірник матеріалів II Міжнародної науково—практичної конференції (м. Київ, 28 жовтня 2024 року). Чернігів: ГО «Науково—освітній інноваційний центр суспільних трансформацій», 2024. DOI: https://doi.org/10.54929/conf_28_10_2024-16-01
12. 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>
13. Balabukh V. O., Zibtsev S. V. Impact of climate change on quantity and area of forest fires in the northern part of the Black Sea Region of Ukraine. Ukrainian Hydrometeorological Journal. 2016. Vol. 18. P. 60–71. DOI: <https://doi.org/10.31481/uhmj.18.2016.07>
14. Patseva I., Herasymchuk L., Kahukina A., Patsev I., Valerko R., Ustymenko V. The impact of forest fires in the context of climate change: an interdisciplinary analysis. Technology Audit and Production Reserves. 2025. Vol. 3(83). P. 25–37. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.331295>

Дата першого надходження статті до видання: 02.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

ФОРМУВАННЯ ВИКИДІВ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН НА ТЕХНОЛОГІЧНИХ СТАДІЯХ ВИРОБНИЦТВА ЦЕМЕНТУ

Коновалюк С.Ю., Кірейцева Г.В., Кірейцев В.О.
Державний університет «Житомирська політехніка»

вул. Чуднівська, 103, 10005, м. Житомир

phde2251_ksyu@student.ztu.edu.ua, gef_kgv@ztu.edu.ua, phde2251_kvo@student.ztu.edu.ua

У статті розглянуто процес формування викидів забруднюючих речовин на технологічних стадіях виробництва цементу з позицій комплексного підходу до оцінки їх джерел, складу та інтенсивності. Актуальність дослідження зумовлена значним внеском цементної промисловості у погіршення якості атмосферного повітря, що підтверджується глобальними оцінками впливу забруднення на здоров'я населення. Метою роботи є систематизація та узагальнення сучасних наукових даних щодо утворення викидів на технологічних стадіях виробництва цементу для обґрунтування ефективних природоохоронних заходів.

У дослідженні проаналізовано основні етапи технологічного процесу, зокрема первинну підготовку сировини, помел сировинної суміші, випал клінкеру, його охолодження, а також помел цементу, пакування та відвантаження готової продукції. Встановлено, що на початкових стадіях виробництва домінують неорганізовані пилові викиди, які формуються внаслідок механічного руйнування та транспортування сировини, причому їх інтенсивність значною мірою залежить від кліматичних умов і технічних характеристик обладнання. На етапі помелу сировинної суміші переважають викиди дрібнодисперсного пилу, що утворюється під час роботи млинів і газоочисних систем, а також у меншій мірі газоподібні забруднювачі.

Особливу увагу приділено процесу випалу клінкеру, який визначено як найбільш екологічно навантажену стадію, що супроводжується утворенням широкого спектра забруднюючих речовин, зокрема CO₂, NO_x, SO₂, CO та пилу. Показано, що формування цих викидів зумовлене як фізико-хімічними процесами декарбонізації сировини, так і спалюванням палива, причому їх рівень залежить від складу матеріалів, температурного режиму та умов горіння. На стадіях охолодження клінкеру та виробництва готового цементу зберігається значна роль пилових викидів, що виникають під час теплообміну, транспортування, подрібнення та пакування матеріалів.

У роботі узагальнено характеристики викидів за стадіями виробництва та встановлено, що пилові забруднювачі є типовими для всього технологічного циклу, тоді як газоподібні викиди формуються переважно на етапі випалу клінкеру. Отримані результати дозволяють визначити найбільш критичні стадії з точки зору впливу на атмосферне повітря та можуть бути використані для вдосконалення систем екологічного моніторингу, оцінки впливу на довкілля і розроблення заходів щодо зниження викидів у цементній промисловості. *Ключові слова:* атмосферне повітря, джерела викидів, забруднюючі речовини, технологічний цикл, екологічна безпека.

Formation of pollutant emissions at the technological stages of cement production. Konovaliuk S., Kireitseva H., Kireitsev V.

The article examines the process of pollutant emission formation at the technological stages of cement production from the standpoint of an integrated approach to assessing their sources, composition, and intensity. The relevance of the study is determined by the substantial contribution of the cement industry to the deterioration of atmospheric air quality, as confirmed by global assessments of the impact of pollution on public health. The aim of the study is to systematize and generalize current scientific data on emission generation at the technological stages of cement production in order to substantiate effective environmental protection measures.

The study analyzes the main stages of the technological process, including primary raw material preparation, raw mix grinding, clinker burning, clinker cooling, as well as cement grinding, packaging, and dispatch of finished products. It has been established that fugitive dust emissions dominate at the initial stages of production; these emissions are generated as a result of the mechanical fragmentation and transportation of raw materials, and their intensity largely depends on climatic conditions and the technical characteristics of the equipment. At the stage of raw mix grinding, emissions of fine particulate matter generated during the operation of mills and gas-cleaning systems predominate, while gaseous pollutants are emitted to a lesser extent.

Particular attention is paid to the clinker burning process, which is identified as the most environmentally burdensome stage and is accompanied by the formation of a wide range of pollutants, including CO₂, NO_x, SO₂, CO, and dust. It is shown that the formation of these emissions is caused both by the physicochemical processes of raw material decarbonization and by fuel combustion, while their levels depend on material composition, temperature conditions, and combustion parameters. At the stages of clinker cooling and finished cement production, dust emissions continue to play a significant role, arising during heat exchange, transportation, grinding, and packaging of materials.

The paper summarizes the characteristics of emissions by production stage and establishes that dust pollutants are typical of the entire technological cycle, whereas gaseous emissions are formed predominantly at the clinker burning stage. The obtained results make it possible to identify the most critical stages in terms of their impact on atmospheric air and may be used to improve environmental monitoring systems, environmental impact assessment, and the development of emission reduction measures in the cement industry. *Key words:* atmospheric air, emission sources, pollutants, technological cycle, environmental safety.



Постановка проблеми. У сучасному світі забруднення атмосферного повітря залишається однією з найгостріших екологічних і медико-соціальних проблем, оскільки, за оцінками ВООЗ, вплив забрудненого повітря пов'язаний приблизно з 6,7 млн передчасних смертей щороку, значна частка населення світу проживає в умовах, де показники якості повітря не відповідають рекомендованим нормам [21]. Виробництво енергії, важка промисловість, а також транспорт є основними чинниками погіршення якості повітря. Підприємства з виробництва цементу є одними з найбільш значних джерел антропогенного забруднення атмосферного повітря. Технологічний процес супроводжується утворенням викидів забруднюючих речовин на всіх стадіях – від первинної підготовки сировини до відвантаження готової продукції, що зумовлює необхідність комплексного аналізу їх формування та пошуку ефективних шляхів їх зменшення. Цементна промисловість є одним із найбільших промислових джерел CO₂ у світі – на її частку припадає близько 7–8% глобальних антропогенних викидів CO₂, а у 2023 році обсяг викидів галузі становив приблизно 2,7–2,9 Гт CO₂ [1]. Загалом глобальні викиди від виробництва цементу у 2023 році досягли 1,56 млрд метричних тонн CO₂, що підкреслює масштаб екологічного навантаження від цієї галузі [2].

Особливої актуальності набуває ідентифікація джерел утворення викидів та встановлення їх якісного і кількісного складу, адже саме це дозволяє визначити внесок окремих технологічних операцій у загальний рівень забруднення атмосферного повітря. Такі дані є необхідними для розроблення науково обґрунтованих природоохоронних заходів, вибору оптимальних технологічних рішень, підвищення ефективності систем очищення газопилових потоків, а також для забезпечення екологічної безпеки прилеглих територій і мінімізації негативного впливу цементного виробництва на довкілля та здоров'я населення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У науковій літературі питання забруднення атмосферного повітря підприємствами цементної промисловості розглядається в різних аспектах залежно від стадії технологічного процесу, виду забруднювальних речовин та умов функціонування виробництва.

Дослідження Ervik T. K. [7] та Thai T. [8] зосереджені на процесах помелу сировини та клінкеру, де розглянуто фізико-хімічні характеристики пилу, його фракційний склад і фактори, що впливають на інтенсивність викидів. Процеси випалу клінкеру та формування газоподібних викидів детально розглянуто у працях John P. J. [13], Mateus M. M. [14] та Wojtacha-Rychter K. [12], де проаналізовано утворення CO₂, NO_x і SO₂ та вплив характеристик палива на їх рівень. Особливості утворення пилу під час охолодження клінкеру висвітлено у роботах Al-Bakri A. Y. [16] та Abdel-Ghani N. T. [17], а джерела пилових

викидів на фінальних стадіях виробництва – у праці Ciobanu C. [10]. Питання моніторингу та верифікації викидів парникових газів на промислових підприємствах України в контексті євроінтеграційних вимог розглядаються у роботах Kireitseva H. V. та ін. [3] і Кірейцевої Г. В. та Хоменка С. В. [11], що підкреслює актуальність систематизації даних про викиди для вітчизняної промисловості.

Незважаючи на широке висвітлення окремих аспектів, у літературі бракує комплексного аналізу формування викидів упродовж усього технологічного циклу цементного підприємства, що ускладнює повноцінну оцінку його екологічного навантаження та обґрунтування природоохоронних заходів.

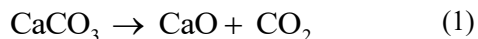
Метою дослідження є комплексний аналіз формування викидів забруднюючих речовин на технологічних стадіях виробництва цементу для систематизації джерел емісії та наукового обґрунтування природоохоронних заходів.

Основні результати та обговорення. Первинна підготовка сировини охоплює процеси дроблення, транспортування та складування матеріалів перед їх подачею на подальшу переробку. На даній стадії формуються переважно неорганізовані пилові викиди, пов'язані з механічним руйнуванням сировини, її пересипанням і переміщенням технологічними комунікаціями. Основними джерелами викидів є дробарки, конвеєри, перевантажувальні вузли та склади сипких матеріалів [6]. Зниження викидів на цьому етапі забезпечується завдяки герметизації обладнання, аспірації та системам пилопригнічення [4; 5].

Етап помелу сировинної суміші та підготовки шихти характеризується переважно викидами від організованих джерел, що виникають у процесі роботи сировинних млинів, сепараторів, циклонів і газоочисного обладнання. Домінуючим забруднювачем є дрібнодисперсний пил, концентрація якого у викидах залежить від ефективності й технічного стану пиловловлювального обладнання [8]. Пил на даній стадії містить дрібніші частинки порівняно з попередніми процесами – переважно фракцій PM10 та PM2.5, що зумовлює його триваліше перебування в повітрі та вищу здатність до перенесення. За фізико-хімічним складом він представлений переважно карбонатними та силікатними компонентами сировинної суміші, зокрема CaCO₃ і SiO₂ [7]. Додатково на цій стадії можуть утворюватися оксиди азоту, діоксид сірки та оксид вуглецю, що пов'язано зі спалюванням палива під час сушіння матеріалу [9]. Інтенсивність викидів визначається типом і продуктивністю обладнання, властивостями сировини та ефективністю систем пиловловлення.

Процес випалу клінкеру характеризується найбільшим впливом на довкілля з поміж інших етапів, оскільки саме на нього припадає до 90 % загального енергоспоживання підприємства та основна частка прямих газоподібних викидів. У пічній системі

формується організований викиди CO_2 , NO_x , SO_2 , CO і пилу, причому їх рівень визначається складом сировинної суміші, видом палива, температурою та повнотою горіння. Домінуючим за обсягом є CO_2 : близько 60 % його утворюється внаслідок декарбонізації вапняку, що описується реакцією:



Викиди оксидів азоту (NO_x) у процесі випалу клінкеру утворюються за високих температур у зоні горіння внаслідок окислення азоту повітря, а також з азоту, що міститься в паливі [14]. Їх інтенсивність залежить від температури факела, вмісту кисню та конструкції пальника, а використання альтернативних палив може сприяти зниженню рівня NO_x [15]. Викиди SO_2 визначаються вмістом сполук сульфуру в сировині та паливі, проте значна частина цього газу зв'язується в лужному середовищі печі й кальцината, тому за сталого режиму його викиди можуть бути невеликими [16]. CO є показником неповного згоряння палива, а пилові викиди виникають унаслідок винесення дрібних частинок сировини й палива з газовим потоком; сучасні системи пиловловлення забезпечують зниження їх концентрацій [10; 13]. Заміна викопного палива альтернативним може вплинути на склад та обсяги викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря [18; 19].

Етап охолодження клінкеру характеризується переважно пиловими викидами, інтенсивність яких залежить від режиму охолодження та ефективності очищення повітря. Джерелом їх утворення є газоповітряний потік, що формується під час теплообміну в холодильниках цементних печей і виносить дрібнодисперсні мінеральні частинки, склад яких визначається сировинною сумішшю, видом палива та тех-

нологічним режимом роботи печі [20]. Основними компонентами такого пилу є сполуки кальцію, кремнію, алюмінію та заліза, а також луги, сульфати і хлориди, що формуються в умовах високотемпературного процесу [17]. Тому для зменшення впливу на атмосферне повітря важливе значення має ефективне пиловловлення та належна очистка повітря на виході з холодильних установок.

Етап помелу цементу, пакування та відвантаження також супроводжується викидами пилу від організованих і неорганізованих джерел. Вони виникають під час помелу клінкеру, транспортування, пересипання, зберігання, пакування та відвантаження цементу, а їх інтенсивність визначається герметичністю технологічних вузлів і ефективністю аспіраційного обладнання [8]. Інтенсивне пилоутворення спостерігається в цементних млинах, сепараторах, на ділянках пересипання матеріалу та під час пакування готової продукції [10]. Пил цього етапу представлений переважно мінералами клінкеру та добавок [12].

Узагальнену характеристику викидів забруднюючих речовин за стадіями виробництва цементу наведено в таблиці 1.

Аналіз даних, наведених у таблиці 1, виявив, що найбільший вплив на довкілля у виробничому циклі цементу має стадія випалу клінкеру, оскільки саме на цьому етапі відбуваються високотемпературна обробка сировини, декарбонізація карбонатів і спалювання палива, що зумовлює утворення значних обсягів CO_2 , NO_x , SO_2 , CO та пилу. Пилові викиди є характерними для всіх стадій виробництва, тоді як газоподібні забруднювачі формуються переважно на етапі випалу клінкеру, що наочно відображено на рисунку 1. Інші стадії виробництва також супроводжуються викидами

Таблиця 1

Характеристика викидів забруднюючих речовин за стадіями виробництва цементу

Стадія виробництва	Основні забруднювачі	Тип викидів	Ключові фактори інтенсивності	Тип джерела
1. Первинна підготовка (дроблення, транспортування)	пил (грубодисперсний), важкі метали (Cr, Pb, Cd, Ni)	пиловий	герметизація обладнання, наявність аспірації та пилопригнічення	неорганізоване
2. Помел сировинної суміші	PM10, PM2.5 (CaCO_3 , SiO_2), NO_x , SO_2 , CO	пиловий + газоподібний	ефективність фільтрів, тип обладнання, вологість сировини	організоване
3. Випал клінкеру (обертова піч)	CO_2 (~60% декарбон. + ~40% паливо), NO_x , SO_2 , CO , пил	газоподібний + пиловий	тип палива, температура факела (>1200°C), конструкція пальника	організоване
4. Охолодження клінкеру	пил (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , сульфати, хлориди)	пиловий	тип холодильника, ефективність пиловловлення на виході	організоване
5. Помел цементу, пакування, відвантаження	пил (аліт, беліт, PM10, PM2.5, сульфати лужних металів)	пиловий	герметичність вузлів транспортування, наявність аспірації	організоване + неорганізоване

Джерело: сформовано автором

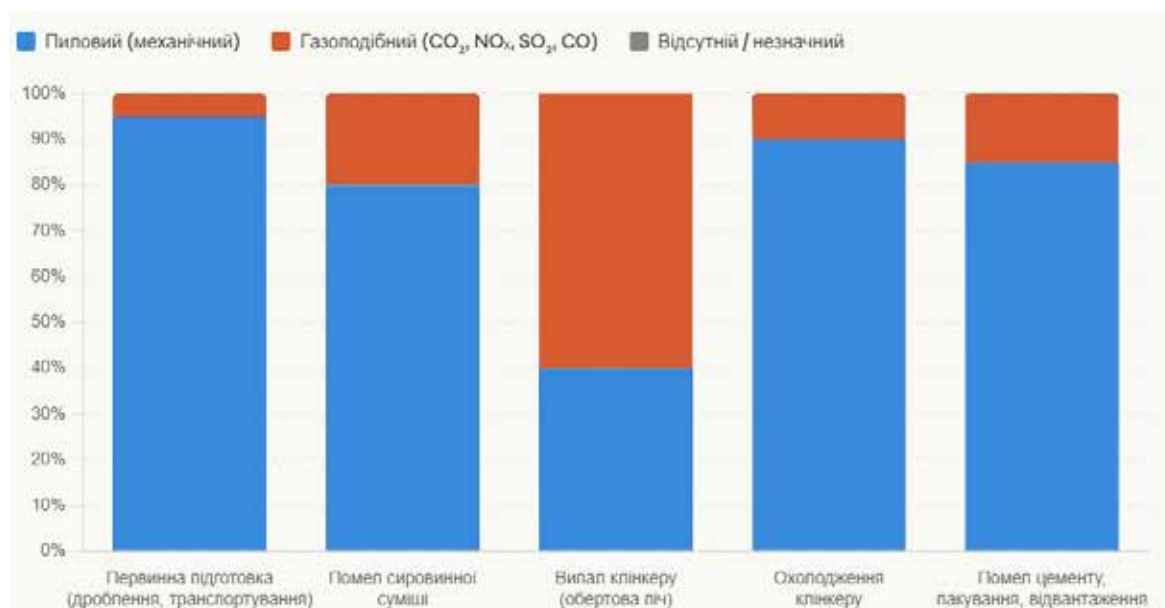


Рис. 1. Співвідношення типів викидів забруднюючих речовин за стадіями технологічного циклу виробництва цементу

Джерело: складено автором за результатами аналізу літературних джерел

забруднюючих речовин, проте їхній вплив є меншим порівняно з процесом випалу, оскільки вони переважно пов'язані з механічною обробкою, транспортуванням або пересипанням матеріалів без інтенсивних фізико-хімічних перетворень.

Аналіз рисунку 1 підтверджує стадійний характер формування викидів у виробництві цементу. На чотирьох із п'яти стадій домінують пилові викиди – їх частка становить від 80 до 95%, що свідчить про механічну природу більшості технологічних операцій підприємства. Принципово відрізняється стадія випалу клінкеру, де співвідношення кардинально змінюється: газоподібні викиди складають близько 60%, а пилові – лише 40%, що зумовлено інтенсивними фізико-хімічними перетвореннями сировини та спалюванням палива за високих температур. На етапі помелу сировинної суміші газоподібна складова також є помітною – близько 20%, що пов'язано з використанням сушильних агрегатів. Таким чином, рисунок наочно ілюструє, що пилові викиди є універсальними для всього технологічного циклу, тоді як газоподібні забруднювачі мають локалізований характер і концентруються переважно на етапі термічної обробки.

Висновки та пропозиції. Проведений аналіз засвідчив, що формування викидів забруднюючих речовин у виробництві цементу має стадійний характер. Пилові викиди є характерними для всіх техно-

логічних стадій підприємства – від первинної підготовки сировини до відвантаження готової продукції, причому їх інтенсивність визначається ступенем герметизації обладнання та ефективністю систем аспірації і пиловловлення. Газоподібні забруднювачі (CO₂, NO_x, SO₂, CO) формуються переважно на етапі випалу клінкеру, який є найбільш екологічно навантаженою стадією виробничого циклу – на нього припадає до 90% загального енергоспоживання підприємства та основна частка прямих газоподібних викидів.

Встановлено, що близько 60% викидів CO₂ на етапі випалу є технологічно немінучими – вони утворюються внаслідок декарбонізації вапняку, що принципово обмежує можливості їх зниження лише за рахунок оптимізації процесів горіння. Решта 40% викидів CO₂ пов'язана зі спалюванням палива і може бути зменшена шляхом впровадження альтернативних видів палива та підвищення енергоефективності пічної системи.

Для зниження впливу цементного виробництва на атмосферне повітря доцільно застосовувати диференційований підхід: на механічних стадіях – підвищувати ефективність пиловловлення і забезпечувати герметизацію обладнання; на стадії випалу – оптимізувати температурний режим, вдосконалювати конструкцію пальників та розширювати використання альтернативних видів палива з нижчим вмістом сірки і азоту.

Література

1. Decarbonizing the Cement Industry. Technological, Economic, and Policy Barriers to CO₂ Mitigation Adoption. MDPI. 2025. URL: <https://doi.org/10.3390/cleantechnol7040085> (дата звернення: 29.03.2026).
2. Global Carbon Project. Carbon dioxide emissions from the manufacture of cement worldwide from 1960 to 2023. Statista. 2024. URL: <https://www.statista.com/statistics/1299532/carbon-dioxide-emissions-worldwide-cement-manufacturing/> (дата звернення: 29.03.2026).

3. Kireitseva H.V., Khomenko S.V., Palii O.V., Kravchuk-Obodzinska T.V., Suprunova I.V. Monitoring of greenhouse gas emissions at mining and processing plants in Ukraine under European integration conditions. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія». 2025. Вип. 33. С. 121-136. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2025-33-09> (дата звернення: 18.03.2026).
4. Cement industry – Associated emissions, environmental issues and measures for the control of the emissions / F. B. Elehinafe та ін. *Mechanical Engineering for Society and Industry*. 2022. Т. 2, № 1. С. 17–25. URL: <https://doi.org/10.31603/mesi.5622> (дата звернення: 18.03.2026).
5. Upadhyay S. K., Tiwari M. K. Pollution control measures of the Cement industry: A case study of Prism Cement Satna. *International Journal of Agricultural Invention*. 2022. Т. 7, № 1. С. 112–119. URL: <https://doi.org/10.46492/ijai/2022.7.1.20> (дата звернення: 18.03.2026).
6. Common analysis methods for gaseous and solid contaminants emitted from different pollution sources: a review paper / Q. M. AJAJ та ін. *Pollution Research*. 2022. С. 416–439. URL: <https://doi.org/10.53550/pr.2022.v4i02.007> (дата звернення: 18.03.2026).
7. Physicochemical characterization of particulate matter in a cement production plant / T. K. Ervik та ін. *Environmental Science: Processes & Impacts*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1039/d2em00139j> (дата звернення: 18.03.2026).
8. Thai T., Bernatik A., Kučera P. Air Pollution Associated with Total Suspended Particulate and Particulate Matter in Cement Grinding Plant in Vietnam. *Atmosphere*. 2021. Т. 12, № 12. С. 1707. URL: <https://doi.org/10.3390/atmos12121707> (дата звернення: 18.03.2026).
9. Bărbulescu A., Hosen K. Cement Industry Pollution and Its Impact on the Environment and Population Health: A Review. *Toxics*. 2025. Т. 13, № 7. С. 587. URL: <https://doi.org/10.3390/toxics13070587> (дата звернення: 18.03.2026).
10. Dust Emission Monitoring in Cement Plant Mills: A Case Study in Romania / C. Ciobanu та ін. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. Т. 18, № 17. С. 9096. URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph18179096> (дата звернення: 18.03.2026).
11. Кірейцева Г.В., Хоменко С.В. Впровадження системи моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів як інструмент євроінтеграції України. Вісник Кременчуцького Національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ. Випуск 1/2025 (150). С. 81-91. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2025.1.10> (дата звернення: 18.03.2026).
12. Wojtacha-Rychter K., Kucharski P., Smolinski A. Conventional and Alternative Sources of Thermal Energy in the Production of Cement—An Impact on CO₂ Emission. *Energies*. 2021. Т. 14, № 6. С. 1539. URL: <https://doi.org/10.3390/en14061539> (дата звернення: 18.03.2026).
13. John J. P. Parametric Studies of Cement Production Processes. *Journal of Energy*. 2020. Т. 2020. С. 1–17. URL: <https://doi.org/10.1155/2020/4289043> (дата звернення: 18.03.2026).
14. Mateus M. M., Neuparth T., Cecilio D. M. Modern Kiln Burner Technology in the Current Energy Climate: Pushing the Limits of Alternative Fuel Substitution. *Fire*. 2023. Т. 6, № 2. С. 74. URL: <https://doi.org/10.3390/fire6020074> (дата звернення: 18.03.2026).
15. Used Tires as Fuel in Clinker Production: Economic and Environmental Implications / A. M. Castañón та ін. *Sustainability*. 2021. Т. 13, № 18. С. 10455. URL: <https://doi.org/10.3390/su131810455> (дата звернення: 18.03.2026).
16. Al-Bakri A. Y., Ahmed H. M., Hefni M. A. Cement Kiln Dust (CKD): Potential Beneficial Applications and Eco-Sustainable Solutions. *Sustainability*. 2022. Т. 14, № 12. С. 7022. URL: <https://doi.org/10.3390/su14127022> (дата звернення: 18.03.2026).
17. Abdel-Ghani N. T., El-Sayed H. A., El-Habak A. A. Utilization of by-pass cement kiln dust and air-cooled blast-furnace steel slag in the production of some “green” cement products. *HBRC Journal*. 2018. Т. 14, № 3. С. 408–414. URL: <https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2017.11.001> (дата звернення: 18.03.2026).
18. MI Z. A Facile Water Treatment Rendering Cement Kiln Dust Reusable in Clinker Manufacturing. *Journal of Waste Resources and Recycling*. 2019. Т. 1, № 1. С. 1–11. URL: <https://doi.org/10.15744/2766-5887.2.101> (дата звернення: 18.03.2026).
19. Orazov P., Nurberdiev R., Khodzhamuradov K. Cement production efficiency improving. *E3S Web of Conferences*. 2023. Т. 376. С. 03013. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337603013> (дата звернення: 18.03.2026).
20. Popov A., Chernev G. THE EFFECT OF CEMENT KILN DUST ON THE PROPERTIES OF CEMENT. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2024. Т. 59, № 6. С. 1341–1346. URL: <https://doi.org/10.59957/jctm.v59.i6.2024.8> (дата звернення: 18.03.2026).
21. Ambient (outdoor) air pollution. URL: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-%28outdoor%29-air-quality-and-health?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 23.03.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 30.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

БЕЗПЕЧНА ЕКСПЛУАТАЦІЯ ПРОМИСЛОВИХ ТРУБОПРОВОДІВ ЯК ЧИННИК СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Кривенко Г.М.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, 76019, м. Івано-Франківськ
galyna.kryvenko@nung.edu.ua

Безпечна експлуатація промислових трубопроводів є одним із ключових чинників забезпечення техногенної та екологічної безпеки об'єктів паливно-енергетичного комплексу. Значна частина промислових трубопроводів експлуатується протягом тривалого часу, що підвищує ризик виникнення аварійних ситуацій, пов'язаних із корозійними пошкодженнями та порушенням герметичності труб.

Метою роботи є дослідження умов безпечної експлуатації промислових трубопроводів. Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі: прогнозування ймовірних аварійних втрат нафти через дефектні отвори та оцінювання можливих площ екологічного забруднення.

Об'єктом дослідження є промисловий трубопровід із значним терміном експлуатації. У роботі проведено аналіз причин виникнення аварій на промислових трубопроводах та виконано класифікацію дефектів з огляду на безпеку експлуатації даної ділянки нафтопроводу на основі аналізу нормативів оцінки. На основі розрахункових залежностей визначено можливі обсяги аварійного витікання нафти через дефектні отвори різних еквівалентних площ. Виконано прогнозування площ забруднення довкілля залежно від параметрів витіку та відстані дефекту від початку трубопроводу.

Отримані результати показали, що найбільші аварійні втрати нафти спостерігаються при виникненні дефектів у початковій частині трубопроводу, де значення тиску є максимальним. Встановлено, що зростання еквівалентної площі дефектного отвору та часу перекриття запірної арматури призводить до істотного збільшення обсягів розливу нафти та площі забруднення довкілля.

Практичне значення дослідження полягає у можливості використання отриманих результатів для прогнозування наслідків аварій та оптимізації режимів експлуатації промислових трубопроводів із значним терміном служби. *Ключові слова:* промисловий трубопровід, аварійний витік, дефектний отвір, екологічна безпека, розлив нафти, сталий розвиток.

Safe Operation of Industrial Pipelines as a Factor of Sustainable Development. Kryvenko G.

Safe operation of industrial pipelines is a key factor in ensuring the technogenic and environmental safety of facilities of the fuel and energy complex. A significant proportion of industrial pipelines have been in operation for a long time, which increases the risk of emergency situations associated with corrosion damage and loss of pipeline integrity.

The aim of this study is to investigate the conditions for the safe operation of industrial pipelines. To achieve this aim, the following tasks were addressed: forecasting probable emergency oil losses through defective holes and assessing potential areas of environmental pollution.

The object of the study is an industrial pipeline with a significant service life. The paper analyzes the causes of accidents on industrial pipelines and classifies defects in terms of operational safety for a specific section of the oil pipeline based on the analysis of existing assessment standards. Based on calculated dependencies, the possible volumes of emergency oil leakage through defective holes of different equivalent areas were determined. The area of environmental pollution was predicted depending on the leak parameters and the distance of the defect from the beginning of the pipeline.

The obtained results showed that the largest accidental oil losses are observed when defects occur in the initial section of the pipeline, where the pressure is the highest. It was established that the increase in the equivalent area of the defective hole and the time required to close the shut-off valve leads to a significant increase in the volume of oil spills and the area of environmental contamination.

The practical significance of the study lies in the possibility of using the obtained results to predict the consequences of accidents and optimize the operating modes of industrial pipelines with a significant service life. *Key words:* industrial pipeline, accidental leak, defective hole, environmental safety, oil spill, sustainable development.

Постановка проблеми. Промислові трубопроводи є важливим елементом інфраструктури нафтогазового комплексу та забезпечують транспортування вуглеводневих енергоносіїв між технологічними об'єктами. Надійність їх функціонування безпосередньо впливає на енергетичну безпеку, економічну стабільність підприємств та стан довкілля.

Значна частина трубопроводів експлуатується протягом тривалого періоду часу, що призводить до поступового погіршення технічного стану металу труб. Основними причинами виникнення аварій є корозійні пошкодження, механічні дефекти, помилки експлуатації та порушення герметичності трубопроводу [1]. Крім того, в сучасних умовах додатковими чинниками ризику стають зовнішні

впливи, пов'язані з воєнними діями, зокрема пошкодження об'єктів енергетичної інфраструктури внаслідок ракетних та артилерійських обстрілів, вибухів, а також порушення технологічних режимів роботи систем транспортування вуглеводнів. Такі фактори підвищують ймовірність аварійних ситуацій, що можуть призводити до масштабних витоків нафти та значного негативного впливу на довкілля.

Аварійні витки нафти можуть спричинити значне забруднення ґрунтів, водних ресурсів та атмосферного повітря, що становить серйозну екологічну загрозу. Тому оцінювання можливих сценаріїв аварій та прогнозування їх наслідків є важливим завданням забезпечення техногенної та екологічної безпеки.

У контексті реалізації принципів сталого розвитку особливого значення набуває впровадження ефективних методів оцінювання ризиків аварій та в подальшому розроблення заходів щодо попередження витоків вуглеводневих енергоносіїв.

Актуальність дослідження та зв'язок авторського доробку з важливими науково-практичними завданнями. Для гарантування безпеки промислових трубопроводів необхідно оцінювати й аналізувати небезпеки, пов'язані зі специфікою їх експлуатації. Як відомо, вплив на навколишнє середовище промислових трубопроводів проявляється протягом усього експлуатаційного періоду. Тому аналіз небезпек під час транспортування вуглеводневих енергоносіїв є особливо актуальним. Прогнозування сценаріїв розвитку аварій, що спричиняють негативний вплив на довкілля, можливе за умови проведення детального аналізу та оцінки небезпек, які виникають в процесі експлуатації об'єкта. Це дасть змогу провести необхідні заходи з попередження виникнення аварійних ситуацій, при цьому не допустити або зменшити негативний вплив на довкілля. У цьому полягає практичне значення авторського доробку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемі забезпечення техногенної безпеки об'єктів паливно-енергетичного комплексу присвячено багато наукових робіт. Це праці Говдяка Р. М., Грудза В. Я, Семчука Я. М та ін. [1-3]. У роботах [4-6] висвітлено проблеми екологічної безпеки під час транспортування вуглеводневих енергоносіїв. Аналіз небезпек під час виникнення аварійних ситуацій, наведено у [7-9]. У роботах [10-12] розглянуто питання оцінки ризику аварій та прогнозування наслідків аварій на потенційно небезпечних виробничих об'єктах. У світовій практиці також значна увага приділяється оцінюванню цілісності трубопроводів, прогнозуванню витоків та моделюванню екологічних наслідків аварій [13-15]. У роботах [6, 8] неповністю враховуються особливості експлуатації промислових об'єктів із значним терміном експлуатації, які можуть призвести до їх відмов.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Більшість сучасних досліджень присвячені питанням оцінювання цілісності

трубопроводів, аналізу корозійних пошкоджень та прогнозуванню витоків вуглеводнів. Проте недостатньо дослідженими залишаються питання прогнозування масштабів екологічного забруднення залежно від параметрів дефектів трубопроводів та режимів їх експлуатації.

Метою роботи є дослідження умов безпечної експлуатації промислових трубопроводів. Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі: прогнозування ймовірних аварійних втрат нафти через дефектні отвори та оцінювання можливих площ екологічного забруднення. Об'єктом дослідження є промисловий трубопровід із значним терміном експлуатації.

Новизна та загальнонаукове значення. Новизна полягає у комплексному дослідженні чинників, що впливають на небезпеку виникнення та наслідки аварійних ситуацій під час транспортування вуглеводневих енергоносіїв: визначенні залежності аварійних втрат нафти від еквівалентної площі дефектного отвору та відстані дефекту від початку трубопроводу; прогнозуванні площі екологічного забруднення при різних сценаріях витoku; обґрунтуванні необхідності коригування режимів тиску для промислових трубопроводів із значним терміном експлуатації.

Викладення основного матеріалу. Вплив на навколишнє середовище промислових трубопроводів проявляється протягом усього експлуатаційного періоду. Оскільки основною формою впливу нафтопроводу на навколишнє середовище є забруднення при витіканні нафти з дефектних отворів ґрунтів, водного середовища та атмосфери, то для підвищення екологічної безпеки експлуатації промислових нафтопроводів необхідно прогнозувати виникнення відмов. Це дасть змогу наперед проводити заходи з мінімізації впливу їх на довкілля. Найбільше відмов спостерігається через чинники техногенного характеру, зокрема корозії, що призводить до виникнення пошкоджень у тілі труби у вигляді тріщин та корозійних свищів різної форми.

Слід виділити, що нафта може витікати через корозійні свищі і пошкодження з характерним розміром до 15 мм та через тріщини, що утворилися в тілі унаслідок механічних пошкоджень, помилок під час експлуатації. Частка витоків через корозійні свищі і пошкодження з характерним розміром до 15 мм складає 70% від загальної кількості розгерметизації, тоді як через тріщини, що утворилися в тілі унаслідок механічних пошкоджень, помилок під час експлуатації – 30% [16].

З метою зниження ризику виникнення аварійних ситуацій та своєчасного виявлення дефектів трубопроводів у сучасній практиці активно застосовуються цифрові системи моніторингу технічного стану трубопровідного транспорту. Одним із ключових інструментів управління технологічними процесами транспортування вуглеводнів є системи диспетчерського контролю та збору даних SCADA,

які забезпечують дистанційний моніторинг тиску, витрати та інших параметрів роботи трубопроводів у режимі реального часу. Використання таких систем дає змогу оперативно реагувати на відхилення технологічних параметрів та запобігати виникненню аварійних ситуацій.

Перспективним напрямом підвищення надійності трубопровідного транспорту є застосування сенсорних мереж на основі технологій Інтернету речей (IoT), які забезпечують постійний контроль стану трубопроводів за допомогою датчиків тиску, температури та вібрації. Для раннього виявлення витоків також застосовуються акустичні системи моніторингу, які фіксують характерні акустичні сигнали, що виникають під час розгерметизації трубопроводу. Важливу роль у забезпеченні технічної надійності трубопроводів відіграє внутрішньотрубна діагностика із застосуванням інтелектуальних діагностичних пристроїв, що дає змогу виявляти корозійні пошкодження, тріщини та інші дефекти на ранніх стадіях їх розвитку. Крім того, сучасні дослідження все частіше використовують методи машинного навчання для прогнозування ймовірності відмов трубопроводів на основі аналізу великих масивів експлуатаційних даних. Використання таких підходів дозволяє підвищити ефективність систем управління ризиками та забезпечити більш безпечну експлуатацію об'єктів трубопровідного транспорту. Застосування зазначених технологій сприяє зменшенню ймовірності аварійних ситуацій, мінімізації екологічних ризиків та забезпеченню сталого функціонування нафтогазової інфраструктури.

За результатами внутрішньотрубної діагностики із застосуванням інтелектуальних пристроїв виділено три групи дефектів з огляду безпеки експлуатації даної ділянки нафтопроводу на основі аналізу нормативів оцінки небезпечності [1] (рис. 1). Дефект, в якого втрати металу максимальні як по глибині, так і по довжині є найбільш небезпечним (група 1).

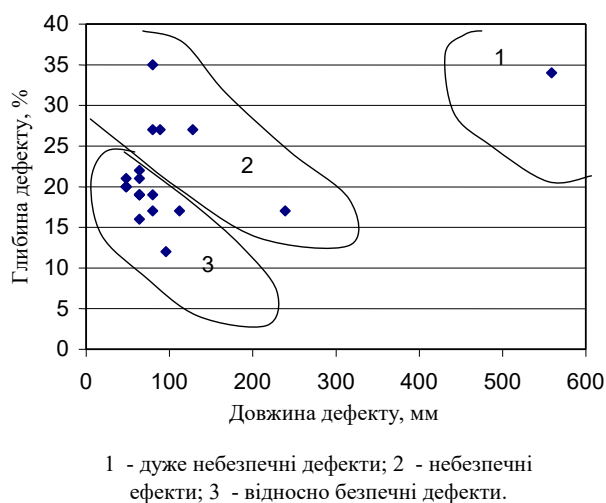


Рис. 1. Залежність глибини дефекту від його довжини

Другу групу дефектів теж потрібно віднести до небезпечних у даний момент, не чекаючи, коли вони стануть причиною аварії. За методикою, наведеною у [16], визначено ймовірність виникнення аварійної ситуації через дефекти, які є в тілі труби. Ймовірність $P_6(20) \approx 0,503$. Отже, спостерігається висока ймовірність виникнення відмов на ділянці трубопроводу. Тому необхідно прогнозувати ймовірну кількість нафти, що може витікати з дефектного отвору та площу забруднення. При цьому важливим завданням є визначення сумарного об'єму нафти до і після закриття запірної арматури на промисловому трубопроводі.

Кількість нафти, що витікає з дефектного отвору визначена за методикою, наведеною у [16].

Маса нафти, яка витікла з аварійного отвору з моменту виникнення аварії до перекриття запірним пристроєм, визначається за залежністю:

$$M(t, s_{ym}) = \int \mu_{\phi} \cdot \rho \cdot s \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta H} dt, \quad (1)$$

де μ – коефіцієнт витрати отвору; ρ – густина нафти, кг/м^3 ; s – площа поперечного перерізу отвору, м^2 ; g – прискорення вільного падіння, м/с^2 ; $H = \frac{\Delta p}{\rho g}$ – напір, при якому відбувається витікання, м .

Площа забруднення довкілля S визначається за залежністю [1]:

$$S = 53,5 \cdot q^{0,89} \quad (2)$$

де q – кількість розлитої нафти, м^3 .

Для дефектів, які є найнебезпечніші, визначено кількість розлитої нафти. При цьому враховувалися їх розміри, напір над центром дефектного отвору та його розташування від початку нафтопроводу.

Визначено максимально можливі аварійні розливи нафти при виникненні дефектних отворів в тілі труби для промислового нафтопроводу, призначеного для транспортування нафти від установки первинної підготовки нафти і газу до пункту наливу.

Для дослідження витікання нафти з дефектних отворів у трубопроводах використано такі дані: довжина промислового трубопроводу $L=30000$ м, внутрішній діаметр $D=0,152$ м, об'ємна витрата $Q = 66 \text{ м}^3/\text{год}$, тиск на початку трубопроводу $p = 1,9$ МПа, густина нафти $\rho = 820 \text{ кг/м}^3$. В'язкість нафти $4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Час перекриття засуви залежить від реалізації сценарію витікання. Якщо розглядати найбільш небезпечний дефект, що знаходиться у першій групі ризику (рис. 1), то час перекриття запірних пристроїв 15 хв, оскільки відношення характерного лінійного розміру отвору до внутрішнього діаметра трубопроводу складає $\frac{L_p}{D} = 1,5$. Для дефектів, які знаходяться у другій групі ризику, (малі та середні тріщини, у яких відношення характерного лінійного розміру отвору до внутрішнього діаметра трубопроводу зна-

ходиться у межах $0,3 \leq \frac{L_p}{D} \leq 0,75$, час ідентифікації витоків та закриття запірних пристроїв коливається у межах від 60 до 240 хвилин в залежності від стану траси промислового трубопроводу [10]. Визначимо, яка кількість нафти може витікати з дефектного отвору, характерний розмір якого $\frac{L_p}{D} = 1,5$ – «гільйотинний розрив». Припускаємо, що такі отвори можуть виникати на таких відстанях від початку трубопроводу: 120 м, 2220 м та 4820 м. Еквівалентна площа дефектного отвору – $0,008034 \text{ м}^2$. Прогнозна оцінка аварійних втрат нафти у випадку «гільйотинного розриву» наведена на рис. 2. Кількість нафти, яка може витікати в результаті «гільйотинного розриву», з дефектного отвору, що знаходиться на відстані 120 метрів від початку трубопроводу, коливається в межах від 80 т до 241 т.

Якщо дефектний отвір є на відстані 4820 метрів, то кількість розлитої нафти коливається в межах від 74 т до 221 т. Лише за швидкого реагування диспетчерських служб відносно перекриття запірних пристроїв можливо зменшити аварійне витікання. Прогнозована площа забруднення довкілля складає від 3154 м^2 до 8415 м^2 .

Визначимо кількість втрат аварійної нафти, (малі та середні тріщини, у яких розміри дефектного отвору $0,3 \leq \frac{L_p}{D} \leq 0,75$). Розглянемо дефектний отвір еквівалентна площа якого $0,00167 \text{ м}^2$. Припускаємо, що такі дефектні отвори другої групи небезпеки можуть виникати на таких відстанях від початку трубопроводу: 250 м, 4850 м та 10850 м. Прогнозована кількість нафти для дефектних отворів різних еквівалентних площ наведена на рис. 3 – 5.

Можлива кількість аварійних втрат нафти для отвору, еквівалентна площа якого $0,00167 \text{ м}^2$, зображена на рис. 3.

З аналізу рис. 3 слідує, що максимальна кількість нафти, що може витікати у випадку аварійної ситуації, з дефектного отвору, що знаходиться на відстані 250 метрів від початку, складає 191 т (час витікання 60 хвилин). Мінімальна кількість аварійної нафти за час витікання 20 хвилин – 66 т. Прогнозована площа забруднення довкілля складає від 2657 м^2 до 6842 м^2 .

На рис. 4 наведено прогнозовану кількість розлитої нафти для дефектного отвору, еквівалентна площа якого дорівнює $0,00132 \text{ м}^2$.

З графічних залежностей на рис. 4 слідує, що максимальна кількість нафти, яка може витікати з дефектного отвору, що знаходиться на відстані 350 метрів від початку трубопроводу, складає 155 т (час витікання 60 хвилин). Мінімальна кількість аварійних втрат нафти за час витікання 20 хвилин – 52 т. Слід відмітити, що на кількість втрат нафти впливає відстань від початку трубопроводу до аварійного отвору. Прогнозована площа забруднення довкілля складає від 2149 м^2 до 8415 м^2 .

З аналізу графіків, наведених на рисунках 3-4 слідує, що, оскільки дані дефекти належать до групи малих та середніх тріщин з параметрами $0,3 \leq \frac{L_p}{D} \leq 0,75$, то аварійні втрати нафти та прогнозована площа забруднення довкілля буде знаходитися у межах одного порядку. Слід зауважити, що дані дефектні отвори створюють загрозу для довкілля. Тому потрібно завчасно проводити заходи щодо забезпечення безаварійної експлуатації промислових трубопроводів.

У процесі експлуатації промислових трубопроводів небезпечними є малі дефекти, що виникають внаслідок корозії металу труби. Еквівалентна площа таких свищів не перевищує $S_{\text{екв.}} \leq 10^{-4} \text{ м}^2$ незалежно від діаметра трубопроводу. На рис. 5 наведено прогнозовану кількість розлитої нафти для такого

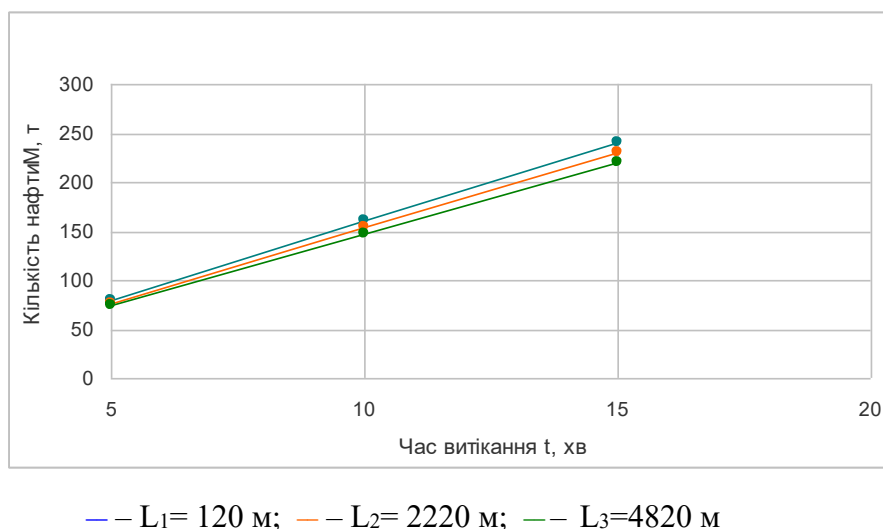
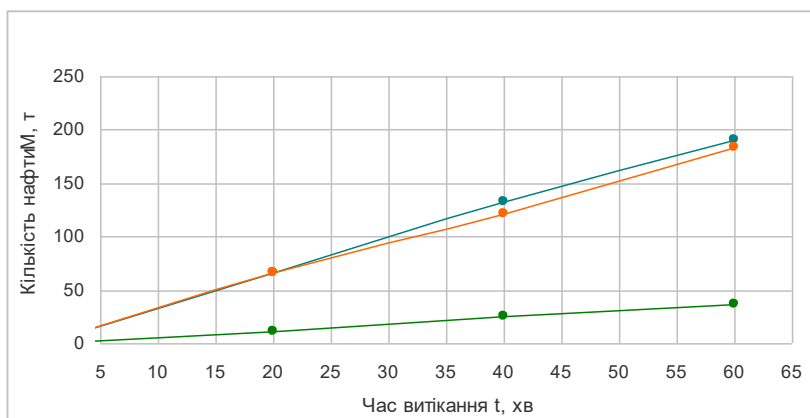
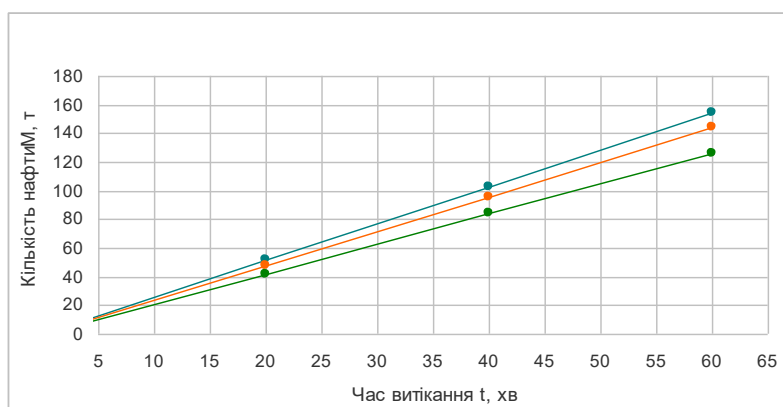


Рис. 2. Прогнозування кількості нафти, яка витікає в результаті «гільйотинного розриву»



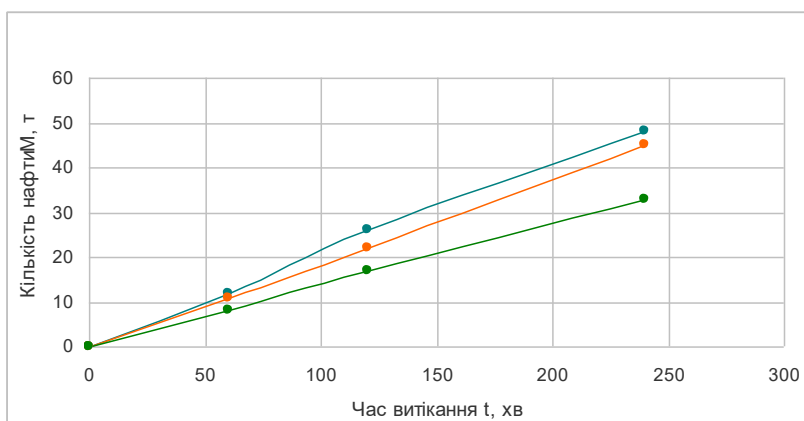
— $L_1=250$ м; — $L_2=4850$ м; — $L_3=10850$ м

Рис. 3. Прогнозування кількості нафти, яка витікає через дефектний отвір



— $L_1=350$ м; — $L_2=5850$ м; — $L_3=11350$ м.

Рис. 4. Прогнозування кількості нафти, яка витікає через дефектний отвір, еквівалентна площа якого $0,00132 \text{ м}^2$



1 – $L_1=160$ м; 2 – $L_2=4160$ м; 3 – $L_3=155600$ м.

Рис. 5. Прогнозування кількості нафти, яка витікає через дефектний отвір, еквівалентна площа якого $0,0001 \text{ м}^2$

дефектного отвору. Еквівалентна площа отвору складає 0,0001 м².

З аналізу графіків, наведених на рис. 5, слідує, що мінімальна кількість аварійних втрат нафти складає 10 т за час витікання 50 хвилин. Максимальна кількість втрат складає 48 т (час витікання 240 хвилин). Прогнозована площа забруднення довкілля коливається від 496 м² до 2002 м².

Результати розрахунків свідчать, що кількість аварійних втрат залежить від еквівалентної площі отвору, режиму роботи промислового трубопроводу, перепаду тиску у промисловому трубопроводі. Тому для безпечної експлуатації промислових трубопроводів необхідно, щоб дефекти в тілі труби будь-якого походження, які виявлені засобами діагностування, були усунені у ході проведення ремонту ще до того, як вони стануть небезпечними. Необхідно коригувати втрати тиску в трубопроводах із значним терміном експлуатації для попередження виникнення аварійних ситуацій, що у контексті глобальних еко-

логічних викликів підвищення надійності трубопроводного транспорту відповідає принципам екологічної відповідальності та сучасним підходам ESG (Environmental, Social, Governance), які передбачають зниження промислових ризиків і мінімізацію негативного впливу виробничої діяльності на навколишнє середовище.

Головні висновки. Оскільки прогнозована кількість аварійних втрат нафти через дефектні отвори, що виявлені на початковій ділянці трубопроводу, найбільша, то необхідно коригувати тиски під час експлуатації промислових нафтопроводів із значним терміном експлуатації для попередження виникнення аварійних ситуацій.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати наукових досліджень, викладені у цій статті, можуть слугувати основою для порівняльного аналізу під час вирішення питань безпечної експлуатації об'єктів, пов'язаних з вуглеводневими енергоносіями, та забезпеченням охорони довкілля.

Література

1. Енергоекологічна безпека нафтогазових об'єктів / Р. М. Говдяк та ін. Івано-Франківськ: «Лілея НВ», 2007. 556 с.
2. Volodymyr Grudz, Andriy Zhdek, Vasyi Bolonnuy. Estimation of flow rate of oil loss as a result of damage of linear part of oil main. *Metallurgical and Mining Industry*. 2016. № 6. P. 75-78.
3. Кривенко Г. М., Кривенко О. В., Семчук Я. М., Ризики безпеки під час експлуатації промислових газопроводів. *Прикарпатський вісник НТШ. Число*. 2024. № 19 (69). С. 197-206.
4. Говдяк Р. М., Коснирев Н. М. Кількісний аналіз аварійного ризику газотранспортних об'єктів підвищеної безпеки. Львів: 2007. 158 с.
5. Стоєцький В. Ф., Дранишников Л. В. Прогнозування наслідків аварій на потенційно небезпечних виробничих об'єктах. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2013. № 43. С. 114-122.
6. Костанян В. Р., Горобинський С. В. Визначення ризиків виникнення нештатних ситуацій на технологічних об'єктах газотранспортної системи. *Нафтова і газова промисловість*. 2011. №3. С. 50-53.
7. Galyna Kryvenko, Yaroslav Semchuk, Halyna Lialiuk-Viter, Ivan Steliga. Ensuring the Environmental Safety of the Oil Pipelines Operation. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*. 2019. Vol. 6, No. 3. P.483-492.
8. Абрамов Ю. О., Тютюник В. В., Шевченко Р. І. Моделювання процесу виникнення техногенної аварії на об'єктах підвищеної безпеки нафтогазової промисловості. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2006. № 3. С. 5-18.
9. Бабаджанова О. Ф., Павлюк Ю. Е, Сукач. Ю. Пожежонебезпечні аварійні виливи нафти з лінійної частини магістрального нафтопроводу. URL: www.nbuiv.gov.ua-2010.
10. Кривенко О. В., Чернова О. Т., Кривенко Г. М. Прогнозування аварійних ситуацій на промисловому трубопроводі. *CXXVIII Міжнародна інтернет-конференція «Сучасні аспекти розвитку науки та техніки в умовах війни»* 17 липня 2023 р. м. Одеса. 2023. С. 70-74.
11. Стоєцький В. Ф., Дранишников Л. В. Прогнозування наслідків аварій на потенційно небезпечних виробничих об'єктах. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2013. № 43. С. 114-122.
12. Соловей В. В., Давидюк О. В., Буц Ю. В. Аналіз та оцінка ризику аварій – основа прийняття рішень при управлінні промисловою безпекою. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2006. № 4. С. 219-231.
13. M. Askari, M. Aliofkhaizraei та S. Afroukhteh. A comprehensive review on internal corrosion and cracking of oil and gas pipelines. *Journal of Natural Gas Science and Engineering* Volume 71, November 2019, 102971.
14. Jens Rosendal Valeur, Lars Wahl Andersen. Performance Standards for Oil Spill Risk. SPE-199532-MS. SPE International Conference and Exhibition on Health, Safety, Environment, and Sustainability. Bogota, Colombia, 17-19 March 2020.
15. Ricardo G. Suarez Suarez, Fabian Carranza Dumon, and Luis Serra Barragan, JohnMcCarthy and Dan McFadyen. A Zero Accident Strategy for Oil Pipelines: Enhancing HSE Performance. SPE-199537-MS. SPE International Conference and Exhibition on Health, Safety, Environment, and Sustainability. Bogota, Colombia, 17-19 March 2020.
16. Kryvenko G., Vozniak L. Forecast of gas mass flow rate in case of the industrial pipeline ruptures. *Journal of New Technologies in Environmental Science. Multidisciplinary Scientific Edition*. 2019. 3.vol. 2. 109-115.

Дата першого надходження статті до видання: 20.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

ЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ПРОТИПОЖЕЖНИХ ЗАХОДІВ У ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМАХ ЖИТОМИРСЬКОЇ ОБЛАСТІ

Мельник-Шамрай В.В., Шамрай В.І., Пацева І.Г., Циганенко-Дзюбенко І.Ю.
Державний університет «Житомирська політехніка»
вул. Чуднівська, 103, 10005, м. Житомир
org_vvm@ztu.edu.ua

Лісові пожежі є одним із ключових чинників деградації лісових екосистем Українського Полісся. У статті досліджено динаміку їх поширення, екологічні наслідки та результативність протипожежних заходів у лісах Житомирської області. Метою роботи є оцінка багаторічних змін пожежної активності в регіоні, визначення впливу пожеж на основні компоненти лісових екосистем і обґрунтування напрямів удосконалення управління пожежною безпекою. Дослідження виконано на основі аналізу офіційних статистичних даних щодо лісових пожеж за 2005–2024 рр., матеріалів Державного агентства лісових ресурсів України та ДСНС, а також узагальнення сучасних наукових джерел. Встановлено, що пожежна активність у лісових екосистемах Житомирського Полісся характеризується значною міжрічною мінливістю та загальною тенденцією до зростання після 2015 року. У найбільш критичні роки кількість пожеж перевищувала середньобаторічні показники більш ніж у 6 разів, а площа, пройдена вогнем, зростала у десятки разів. Зокрема, катастрофічні пожежі 2020 року та підвищена пожежна небезпека у 2022–2024 рр. були зумовлені поєднанням тривалих посух, високих температур, антропогенного навантаження та воєнних чинників. Визначено, що найбільш пожежонебезпечними є соснові насадження на піщаних ґрунтах і торфові екосистеми. У таких умовах пожежі призводять до втрати гумусу, порушення ґрунтових біогеохімічних процесів, зниження продуктивності деревостанів, скорочення біорізноманіття та формування вторинних березово-осикових угруповань. Оцінка функціонування системи охорони лісів від пожеж показала, що в Україні сформована розгалужена інфраструктура протипожежного захисту, яка налічує понад 190 лісових пожежних станцій, більш як 2300 одиниць спеціалізованої техніки та близько 460 спостережних веж. Це забезпечує відносно оперативну локалізацію загорянь, що підтверджується невеликою середньою площею однієї пожежі – близько 4,5 га у 2025 році. Водночас система має переважно реактивний характер і потребує посилення профілактичних заходів. Обґрунтовано доцільність переходу до проактивної моделі управління пожежною безпекою, що передбачає використання дистанційного моніторингу, картування пожежних ризиків і регулювання запасів горючих матеріалів. Реалізація цих підходів сприятиме зменшенню частоти та масштабів лісових пожеж і підвищенню екологічної стійкості лісових екосистем регіону. *Ключові слова:* лісові пожежі, екологічні наслідки, біорізноманіття, охорона лісів, протипожежні заходи, пожежна безпека, лісові екосистеми

Ecological consequences of forest fires and improvement of the fire protection system in forest ecosystems of Zhytomyr region.
Melnyk-Shamrai V., Shamrai V., Patseva I., Tsyhanenko-Dziubenko I.

Forest fires are among the key factors contributing to the degradation of forest ecosystems in the Ukrainian Polissia region. This paper investigates the dynamics of their occurrence, ecological consequences, and the effectiveness of fire-prevention measures in the forests of Zhytomyr Region. The aim of the study is to assess long-term changes in fire activity in the region, determine the impact of fires on the main components of forest ecosystems, and substantiate directions for improving wildfire risk management. The research is based on the analysis of official statistical data on forest fires for the period 2005–2024, materials from the State Forest Resources Agency of Ukraine and the State Emergency Service of Ukraine, as well as a synthesis of recent scientific publications. The results indicate that fire activity in the forest ecosystems of Zhytomyr Polissia is characterized by significant interannual variability and an overall increasing trend after 2015. In the most critical years, the number of fires exceeded long-term average values by more than six times, while the burned area increased by several tens of times. In particular, catastrophic fires in 2020 and the heightened fire danger observed in 2022–2024 were associated with prolonged droughts, high air temperatures, increased anthropogenic pressure, and the impact of military actions. The study shows that pine stands on sandy soils and peatland ecosystems are the most vulnerable to fire. Under such conditions, fires lead to humus loss, disruption of soil biogeochemical processes, reduced forest productivity, biodiversity decline, and the formation of secondary birch- and aspen-dominated stands. The assessment of the existing forest fire protection system revealed the presence of a well-developed fire-prevention infrastructure in Ukraine, including more than 190 forest fire stations, over 2,300 units of specialized equipment, and about 460 observation towers. This ensures relatively rapid fire detection and suppression, as evidenced by the relatively small average area of a single fire (approximately 4.5 ha in 2025). However, the system remains largely reactive and requires strengthening of preventive and forecasting measures. The study substantiates the need to shift towards a proactive wildfire risk management model based on remote sensing technologies, fire risk mapping, and fuel load reduction. The implementation of these approaches will contribute to reducing the frequency and scale of forest fires and enhancing the ecological resilience of forest ecosystems in the region. *Key words:* forest fires, ecological consequences, biodiversity, forest protection, fire-prevention measures, fire hazard, forest ecosystems.



Постановка проблеми. У сучасних умовах спостерігається чітка тенденція до зростання кількості та масштабів лісових пожеж, що набуває глобального характеру та становить серйозну загрозу для природних екосистем. Одним із ключових чинників цього процесу є кліматичні зміни, які проявляються у підвищенні температури повітря, зменшенні кількості опадів і збільшенні тривалості посушливих періодів, що суттєво підвищує пожежну небезпеку. Водночас значний вплив на виникнення пожеж має антропогенний фактор, пов'язаний із господарською діяльністю, порушенням правил пожежної безпеки та навмисними підпалами. В останні роки додатковим чинником впливу є військові дії, які спричиняють виникнення нових осередків займання та ускладнюють оперативне реагування на пожежі. Особливої вразливості зазнають соснові ліси Полісся, що зумовлено їх природними особливостями, зокрема високою смолистістю, сухістю підстилки та зростанням на бідних піщаних ґрунтах. У сукупності ці фактори обумовлюють необхідність комплексного дослідження екологічних наслідків лісових пожеж та вивчити особливості впровадження протипожежних заходів на регіональному рівні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ліси відіграють фундаментальну роль у підтримці екологічної рівноваги планети, будучи ключовим об'єктом сталого розвитку та необхідною умовою для збереження стабільного клімату. Однією з найбільш руйнівних загроз для лісових екосистем є пожежі, які на сучасному етапі розглядаються як один із найважливіших екологічних викликів, що масштабно впливають на стан біорізноманіття, екологічні процеси та зумовлюють значні викиди парникових газів [1]. Лісові пожежі визначаються як неконтрольоване поширення процесу горіння рослинного покриву в межах лісових екосистем. Залежно від характеру поширення вогню їх поділяють на низові, верхові та підземні (торф'яні). За ступенем інтенсивності горіння та швидкістю поширення пожежі класифікують на слабкі, середні та сильні [2, 3].

Проблема лісових пожеж в Україні останніми роками набула критичного значення через поєднання глобальних кліматичних змін, зростання антропогенного навантаження та наслідків збройної агресії [4]. За даними багаторічного аналізу [5, 6], лісові пожежі є сталим явищем, причому Україна характеризується вищою горимістю лісів порівняно з такими сусідніми країнами. В середньому щороку пожежами пошкоджується близько 0,07 % загальної площі лісів.

У публікаціях [4, 7] автори підкреслюють, що природна пожежна небезпека насаджень безпосередньо залежить від лісотипологічних особливостей та екологічних умов існування живих організмів: породного складу, запасу підстилки та рясності живого надґрунтового вкриття. Так, у своїх дослідженнях [4] вони встановили, що найбільш пожежо-

небезпечними є сухі та дуже сухі соснові бори (A_0 , A_1), де виявлено найбільшу кількість видів рослин, здатних швидко займатися (14 видів злакових, 11 осокових тощо). На основі цих даних було удосконалено шкалу оцінювання пожежної небезпеки, розділивши типи лісу на п'ять класів.

У роботах [8, 9] зазначено, що додатковим чинником ризику є поширення шкідників та хвороб, що з врахуванням кліматичних змін пригнічує життєздатність дерев, що провокує спалахи популяцій короїдів та дефоліантів. Уражені ліси накопичують велику кількість сухої біомаси, що різко підвищує їхню горимість.

Глобальне потепління зумовлює збільшення тривалості пожежонебезпечного періоду та частоти екстремальних погодних умов. У статті [10] дослідники використовуючи регіональні кліматичні моделі, спрогнозували, що до кінця XXI століття кількість спекотних днів (із температурою понад 35°C) може зрости у 3–9 разів залежно від сценарію (RCP4.5 чи RCP8.5). Це призведе до подвоєння щільності пожеж, особливо у степовій зоні та південно-східних регіонах. Встановлено середній кореляційний зв'язок ($r=0,54$) між зростанням середньорічної температури та площею пожеж в Україні [11].

Катастрофічні пожежі 2020 року в Київській, Житомирській, Луганській та Харківській областях стали «антирекордом» для України [12, 13]. За оцінками дослідників [12], вогнем було охоплено понад 23 тис. га, втрачено близько 2 Мт деревини, а в атмосферу викинуто до 1 Мт диму та 5,2 Мт вуглекислого газу. Теплова енергія цих пожеж (понад 20 ПДж) еквівалентна вибуху 5-мегатонної бомби. Крім хімічного забруднення, зафіксовано значне акустичне та інфразвукове навантаження на довкілля.

У публікаціях [14, 15] автори здійснюють комплексний аналіз деструктивної трансформації лісових екосистем України та Житомирської області під впливом воєнної агресії, класифікуючи збитки за механічними, пірогенними та хімічними чинниками. З початком повномасштабного вторгнення РФ фактори виникнення пожеж суттєво змінилися. Так, у 2022 році кількість пожеж зросла в 1,5 рази порівняно з попереднім роком, а основною причиною (62 %) стали обстріли, мінування та активні бойові дії. Особливу небезпеку становлять пожежі на радіоактивно забруднених територіях, що спричиняють трансграничний перенос радіонуклідів [16].

У роботі [17] встановлено, що пожежі відіграють важливу роль у функціонуванні глобальних екосистем, впливаючи на біосферні процеси, кліматичні умови та структуру лісових біомів. Водночас обґрунтовано, що внаслідок зростання антропогенного впливу спостерігається тенденція до підвищення частоти та інтенсивності пожеж. Ряд наукових досліджень присвячений аналізу впливу лісових пожеж на рослинний покрив лісових екосистем та здійснено прогнозування їх екологічних наслідків

[18, 19], а також досліджено взаємодію комах-шкідників з порушеннями лісових екосистем, що суттєво посилює деградацію лісів і ускладнює процеси їх відновлення [20].

Проблема охорони лісів від пожеж потребує зосередження насамперед на заходах попередження та своєчасного виявлення загорянь. Дієва протипожежна охорона лісів передбачає реалізацію комплексу організаційних, технічних і лісогосподарських заходів, спрямованих на недопущення виникнення пожеж, обмеження їх поширення та мінімізацію наслідків. Особливого значення набуває удосконалення системи профілактики, моніторингу та оперативного реагування, що забезпечує підвищення рівня захищеності лісових екосистем від пожеж.

У роботі [21] досліджувалося питання реагування пожеж в лісах, де авторами виявлено низку недоліків даної системи, зокрема правові колізії у розподілі повноважень між Держлісагентством та ДСНС. Так, автори пропонують моноцентричну модель управління, де ДСНС відповідає за надзвичайні ситуації регіонального рівня, а лісокористувачі – за профілактику та локальні загоряння. Автори [22] наголошують на необхідності переходу до інтегрованої системи управління пожежами (ICS), яка успішно використовується в США та Австралії. Сучасні методи дослідження, такі як кластерний аналіз за допомогою VOSviewer, показують, що світова наука зміщує фокус на інтеграцію ГІС-технологій, супутникового моніторингу (MODIS) та штучного інтелекту для прогнозування пожеж [1]. Так, використовуючи методи дистанційного зондування землі дослідники встановили, що реальна площа ландшафтних пожеж в Україні (включаючи сільськогосподарські пали) є значно більшою, ніж офіційна статистика, і сягає близько 2 млн га щороку [6].

Закордонні дослідження свідчать, що одним із ефективних підходів до зниження пожежної небезпеки в лісових екосистемах є застосування контрольованих (планових) випалів та інших заходів зменшення запасу лісових горючих матеріалів. Зокрема, в роботі [23] доведено ефективність таких заходів для зниження ризику виникнення масштабних лісових пожеж та регулювання кількості горючих матеріалів. Сучасні дослідження також підтверджують, що контрольовані випали можуть виконувати роль інструменту екологічного відновлення та підтримання біорізноманіття, знижуючи інтенсивність майбутніх пожеж [24]. Крім того, концепція інтегрованого управління пожежами розглядається як найбільш ефективний підхід, що поєднує профілактику, моніторинг та реагування.

Проведений аналіз наукових джерел свідчить, що проблема лісових пожеж є комплексною та багатофакторною, оскільки охоплює кліматичні, екологічні, лісотипологічні та антропогенні чинники. Встановлено, що сучасні дослідження переважно зосереджуються на оцінюванні глобальних

наслідків пожеж, їх ролі в трансформації екосистем, а також на вдосконаленні систем моніторингу, прогнозування та реагування. Значна увага приділяється інтегрованим підходам до управління пожежами, зокрема впровадженню ГІС-технологій, супутникового спостереження та заходів зниження горючого навантаження.

Водночас недостатньо дослідженим залишається питання регіональної специфіки впливу пожеж на лісові екосистеми, зокрема Полісся України, яке характеризується унікальними природно-лісовими умовами та підвищеною пожежною небезпекою соснових насаджень. Крім того, потребує більш глибокого аналізу ефективність існуючих протипожежних заходів у регіональному контексті, їх відповідність сучасним кліматичним викликам та умовам воєнного впливу. Таким чином, актуальним є подальше дослідження впливу лісових пожеж на лісові екосистеми Полісся України та комплексний аналіз дієвості протипожежних заходів з метою оптимізації систем охорони лісів від пожеж.

Метою статті є оцінка екологічних наслідків лісових пожеж та вивчення рівня впровадження протипожежних заходів у лісових екосистемах Житомирської області. Об'єктом досліджень: лісові екосистеми Житомирської області. Предмет досліджень – екологічні наслідки лісових пожеж для основних компонентів лісових екосистем та особливості впровадження протипожежних заходів у регіоні.

Новизна отриманих результатів полягає в тому, що отримано комплексне узагальнення екологічних наслідків лісових пожеж у лісових екосистемах Житомирського Полісся, вивчено особливості існуючої системи протипожежних заходів у лісах Житомирської області та обґрунтовано напрями вдосконалення системи управління пожежними ризиками на основі адаптації сучасних європейських практик, зокрема впровадження технологій раннього виявлення, прогнозування та управління горючими матеріалами. Результати дослідження можуть бути використані лісогосподарськими підприємствами для вдосконалення системи протипожежного захисту лісів, підвищення ефективності моніторингу та раннього виявлення пожеж, оптимізації заходів із запобігання їх виникненню та поширенню, а також розроблення стратегій відновлення лісових екосистем після пожеж.

Методика досліджень. Дослідження виконано із застосуванням комплексу загальнонаукових і спеціальних методів, що забезпечили системний аналіз динаміки лісових пожеж, їх екологічних наслідків та дієвості протипожежних заходів у лісових екосистемах Житомирського Полісся. Інформаційну основу становили офіційні статистичні дані щодо лісових пожеж за період 2005–2024 рр., аналітичні матеріали ДСНС України, звітні дані Державного агентства лісових ресурсів України, а також результати нау-

кових досліджень і публікації у фахових виданнях. Системний підхід забезпечив комплексний аналіз впливу пожеж на основні компоненти лісових екосистем, включаючи деревостан, ґрунтовий покрив і біорізноманіття.

Виклад основного матеріалу. Упродовж 2025 року лісові пожежі залишалися однією з найбільш актуальних загроз для лісових екосистем України, завдаючи значних екологічних та економічних втрат. Загалом у лісах було ліквідовано 1238 пожеж на загальній площі 5565,5 га, що свідчить про позитивну динаміку порівняно з попереднім роком – їх кількість зменшилася на 38,0 %, а площа поширення вогню – на 77,0 % [25]. Водночас значну частку становили великі лісові пожежі: зафіксовано 121 випадок, які охопили 4 420,6 га, з них 98,4 га – верхові пожежі. Середня площа однієї пожежі становила 4,5 га, що характеризує відносно оперативне реагування на осередки займання. Орієнтовні збитки від лісових пожеж перевищили 2305,8 млн грн. Важливу роль у ліквідації пожеж відігравали підрозділи ДСНС України, за участю яких було ліквідовано 685 пожеж, що становить понад половину (55 %) від їх загальної кількості [25].

Лісові пожежі виступають одним із найпотужніших факторів деградації лісових екосистем України, особливо в межах Полісся, де поєднання природних і антропогенних умов зумовлює підвищений рівень пожежної небезпеки. Житомирська

область є серед лідерів за кількістю випадків загорянь і площею пошкоджених лісів. Природно-кліматичні умови регіону формують комплекс умов, сприятливих для виникнення та стрімкого поширення пожеж, зокрема великі площі лісових масивів, домінування соснових насаджень, піщані ґрунти з низькою здатністю утримувати вологу, а також часті весняно-літні посухи.

Узагальнення багаторічних статистичних даних щодо лісових пожеж у Житомирській області за останні два десятиліття показує виражену мінливість як у частоті випадків, так і в площах пройдена вогнем (рис. 1).

Результати аналізу свідчать, що середня кількість випадків лісових пожеж у Житомирській області варіює. Так, у період 2005–2013 рр. кількість пожеж залишалася переважно на середньому рівні (35–70 випадків на рік), із відносно невеликими площами ураження. Починаючи з 2015 року, спостерігається різке зростання пожежної активності, що пов'язується з аномально посушливими умовами та підвищеним антропогенним навантаженням. Особливо критичним став 2020 рік, коли кількість пожеж перевищила середні багаторічні показники більш ніж у 6 разів, а загальна площа пройдена вогнем зросла у десятки разів порівняно з іншими роками. У 2022–2024 рр. зберігається високий рівень пожежної небезпеки, що додатково посилюється впливом воєнних факторів, обмеженим доступом до окремих

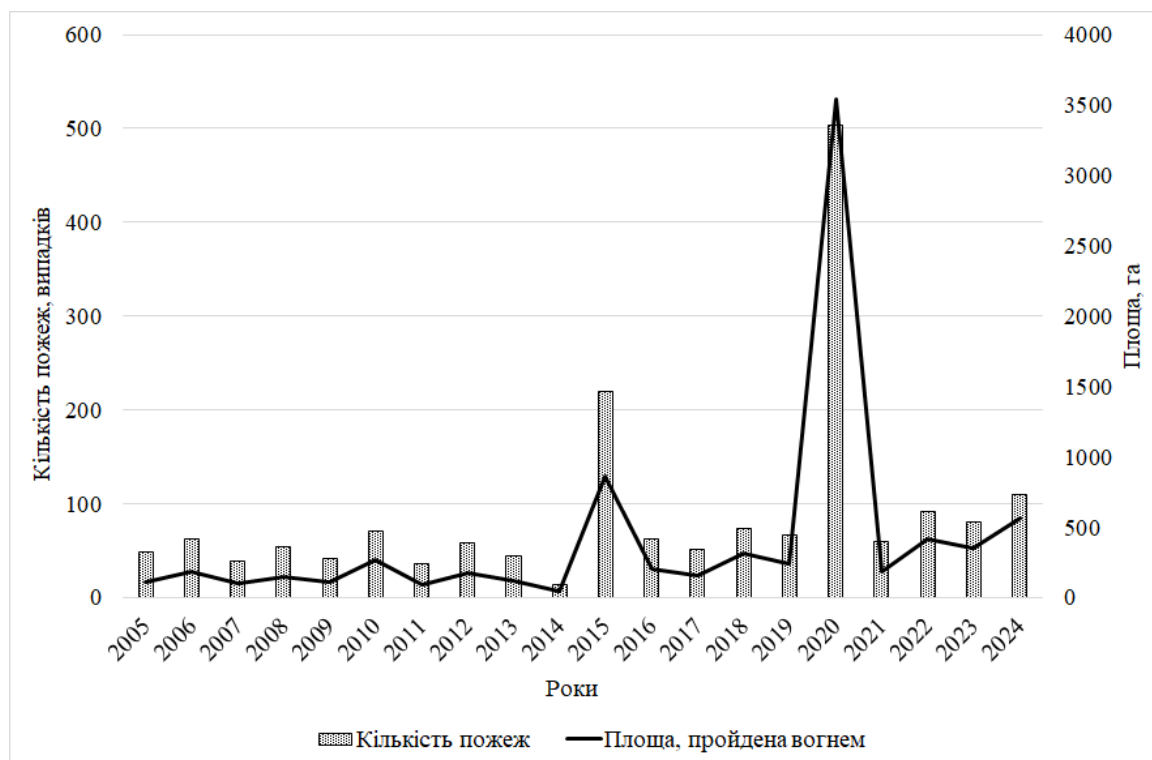


Рис. 1. Динаміка лісових пожеж у Житомирській області за 2005–2024 рр.

Джерело: побудовано авторами на основі узагальнення матеріалів регіональних зведень ДСНС, Держлісагентства та екологічних звітів

територій та ускладненням оперативного реагування.

Екологічні наслідки лісових пожеж мають комплексний характер і проявляються на всіх рівнях організації екосистем – від ґрунтового покриву до біорізноманіття та атмосферних процесів. У лісових екосистемах Житомирського Полісся, де домінують соснові насадження на бідних піщаних ґрунтах, вплив пожеж є особливо відчутним і часто призводить до тривалих порушень природних сукцесійних процесів. Залежно від інтенсивності та типу пожеж (низові, верхові, підземні), а також тривалості їх дії, формуються різні за масштабами та глибиною екологічні зміни. Узагальнену характеристику основних екологічних наслідків лісових пожеж у Житомирському Поліссі представлено в табл. 1.

Наведені дані свідчать, що лісові пожежі мають системний і багаторівневий вплив на екосистеми Житомирського Полісся. Найбільш чутливими до вогневого впливу є деревостан та ґрунтовий покрив, де спостерігаються тривалі порушення, що можуть зберігатися протягом кількох десятиліть. Водночас трав'яний покрив та частина фауни характеризуються відносно швидшим відновленням, однак навіть у цих компонентах відбуваються суттєві зміни

видового складу. Сукупність зазначених впливів призводить до порушення екосистемної рівноваги, зміни сукцесійних напрямків та зниження здатності лісових екосистем до самовідновлення. Це обґрунтовує необхідність врахування специфіки Полісся при оцінці екологічних ризиків та розробленні заходів з відновлення і сталого управління лісами.

Ведення обліку та організація заходів із запобігання і гасіння лісових пожеж в Україні здійснюються відповідно до вимог чинної нормативно-правової бази [26, 27]. Зазначені документи визначають єдині підходи до обліку пожеж, їх класифікації, збору та подання інформації, а також регламентують систему організації охорони лісів, включаючи профілактичні, моніторингові та протипожежні заходи. Відповідно до цих нормативів, безпосереднє здійснення заходів із охорони лісів від пожеж, їх виявлення, гасіння та обліку покладається на постійних лісокористувачів, тобто лісгосподарські підприємства, які зобов'язані забезпечувати пожежну безпеку на підвідомчих територіях.

Держлісагентство України системно впроваджує сучасні підходи до моніторингу та контролю лісових пожеж, поєднуючи традиційні методи з інноваційними технологіями спостереження. В Україні

Таблиця 1

Екологічні наслідки лісових пожеж у лісах Житомирської області

Компонент лісу	Характер впливу	Особливості в Поліссі	Екологічні наслідки
Деревостан	Термічний, біологічний	Вигорання соснових насаджень, пошкодження кори та камбію	Загибель дерев, зниження продуктивності, формування сухостою
Підлісок і трав'яний ярус	Термічний, біологічний	Повне або часткове вигорання рослинності	Втрата видового різноманіття, зміна видового складу
Лісова підстилка	Термічний, хімічний	Вигорання органічного шару	Порушення кругообігу речовин, зменшення запасів органіки
Ґрунти (особливо торфові)	Термічний, фізико-хімічний	Вигорання гумусу, тління торфу, гідрофобізація	Деградація ґрунтів, зниження родючості, просідання поверхні
Ґрунтова біота	Біологічний	Загибель мікроорганізмів, безхребетних	Порушення процесів гумусоутворення та мінералізації
Тваринний світ	Біологічний	Загибель дрібних тварин, втрата місць існування	Скорочення популяцій, міграція видів
Атмосферне повітря в межах екосистеми	Хімічний	Викиди продуктів горіння, особливо при торф'яних пожежах	Погіршення якості повітря, токсичний вплив на біоту
Гідрологічний режим	Гідрологічний	Порушення водоутримуючої функції лісу, осушення боліт	Зниження рівня ґрунтових вод, деградація болотних екосистем
Біорізноманіття	Екосистемний	Втрата характерних поліських видів	Спрощення екосистем, зниження їх стійкості
Ландшафтна структура	Геоекологічний	Порушення мозаїчності (ліс–болото–луки)	Деградація природних комплексів
Сукцесійні процеси	Екосистемний	Поширення піонерних видів (береза, осика)	Формування вторинних лісів, зміна типу екосистем

Джерело: створено авторами на основі аналізу літератури

система охорони лісів від пожеж є важливою складовою ведення лісового господарства та функціонує на засадах комплексного підходу до їх попередження, виявлення і ліквідації. З цією метою в державі створено розгалужену інфраструктуру протипожежного захисту, яка налічує понад 190 лісових пожежних станцій, більше ніж 2300 одиниць спеціалізованої протипожежної техніки, а також понад 460 спостережних веж, що забезпечують своєчасне виявлення осередків займання. Для підвищення ефективності моніторингу також застосовуються супутникові технології, які дають змогу виявляти термічні аномалії на території лісового фонду, зокрема у віддалених і важкодоступних районах, що не охоплені стаціонарними системами спостереження. Поряд із технічними засобами значна увага приділяється профілактичним заходам: створено 2,8 тис. км протипожежних бар'єрів, облаштовано 39,7 тис. км мінералізованих смуг та забезпечено догляд за ними на рівні 187,6 тис. км. З метою обмеження доступу транспорту до лісових масивів у пожежонебезпечний період перекрито 6,5 тис. позапланових лісових доріг. Важливою складовою профілактичної роботи є інформаційно-роз'яснювальна діяльність, у межах якої встановлено 5,7 тис. одиниць наочної агітації, опубліковано 233 інформаційні матеріали та забезпечено 55 виступів у засобах масової інформації, зокрема на телебаченні та радіо. Також проведено 8,1 тис. лекцій і бесід із населенням [25].

У надлісництвах Житомирської області, зокрема Баранівському, Коростенському, Звягельському, Білорівницькому, Радомишльському та Коростишівському, система охорони лісів від пожеж

організована в межах єдиної структури ДП «Ліси України» через філію «Столичний лісовий офіс», до складу якої входять зазначені підрозділи. Основу цієї системи становить комплекс взаємопов'язаних заходів, що включає профілактику, моніторинг, оперативне реагування та ліквідацію пожеж (табл. 2). Відмінності в протипожежних заходах полягають переважно у природних умовах та рівні пожежної небезпеки окремих територій. Для надлісництв Житомирської області характерні переважно високі та дуже високі рівні пожежної небезпеки (IV–V класи), що зумовлено домінуванням соснових насаджень, наявністю піщаних ґрунтів і торфовищ, а також частими посушливими періодами.

У сучасних умовах зміни клімату, зростання антропогенного навантаження та збільшення частоти екстремальних погодних явищ проблема виникнення та поширення пожеж, особливо лісових, набуває загальноєвропейського значення. Європейські країни демонструють (табл. 3) різноманітні підходи до боротьби з пожежами та їх попередження, що зумовлено природно-кліматичними умовами, рівнем соціально-економічного розвитку, особливостями лісокористування та державної політики у сфері цивільного захисту.

У країнах Європи боротьба з пожежами базується на поєднанні профілактики, раннього виявлення та швидкої ліквідації. Попередження пожеж включає постійний моніторинг лісів за допомогою супутників і систем типу EFFIS, використання датчиків і дронів для виявлення загорянь на ранніх стадіях, а також управління рослинністю (створення протипожежних розривів, очищення сухої

Таблиця 2

Організація охорони лісів від пожеж у надлісництвах Житомирської області

Надлісництво	Профілактичні заходи	Моніторинг і виявлення	Оперативне реагування	Особливості	Рівень пожежної небезпеки
Баранівське	Мінералізовані смуги, аншлаги, обмеження доступу	Патрулювання, спостережні вежі	Пожежні станції, техніка	Хвойні насадження	Високий (IV клас)
Коростенське	Перекриття доріг, профілактика	Постійний моніторинг, відеоспостереження	Залучення ДСНС, значні ресурси	Торфовища, соснові ліси	Дуже високий (V клас)
Звягельське	Мінералізовані смуги, інформаційні щити	Лісова охорона, спостереження	Координація між підрозділами	Великі площі лісів	Високий (IV клас)
Білорівницьке	Обмеження відвідування, профілактика	Посилене патрулювання	Швидке реагування	Сухі бори, піщані ґрунти	Дуже високий (V клас)
Радомишльське	Інформаційна робота, смуги	Патрулювання, контроль	Пожежна техніка	Близькість до населених пунктів	Середній–високий (III–IV клас)
Коростишівське	Аншлаги, профілактика	Моніторинг, класи небезпеки	Організація гасіння	Рекреаційне навантаження	Середній (III клас)

Джерело: створено авторами на основі узагальнення інформації з офіційних джерел ДП «Ліси України»

Таблиця 3

Досвід Європейських країн щодо боротьби, профілактики та попередження лісових пожеж

Країна	Особливості	Основні профілак. заходи	Основні методи гасіння	Технології	Приклади практик
Іспанія	Часті великі лісові пожежі, швидке реагування	Контроль рослинності, протипожежні розриви	Авіаційне гасіння (літаки, гелікоптери), наземні бригади	Супутниковий моніторинг, AI-моделі прогнозу пожеж	Моделі оцінки ризику пожеж
Франція	Потужна державна пожежна служба	Планування територій, обмеження забудови	Комбіновані сили (наземні + авіація)	Пожежні літаки Canadair, цифрові карти ризику	Заборона будівництва в небезпечних зонах
Італія	Високий рівень координації	Лісоуправління, очищення територій	Національна система цивільного захисту	Дрони, геоінформаційні системи (GIS)	Контроль сухої рослинності
Греція	Сильна сезонність пожеж	Сезонні обмеження діяльності	Масове використання авіації	Мобільні командні центри	Обмеження доступу до лісів
Португалія	Часті катастрофічні пожежі	Масштабні реформи після пожеж	Спеціалізовані лісові бригади	Автоматичні системи виявлення	Обов'язкове очищення територій
Німеччина	Менше масштабних пожеж	Освітні кампанії, контроль людського фактору	Наземне гасіння, локалізація	Сенсори, системи раннього виявлення	Інформаційні кампанії
Швеція	Великі лісові масиви	Система дозволів на вогонь	Локалізація та контроль поширення	Використання добровольців + авіація	Моніторинг погодних умов

Джерело: створено авторами на основі аналізу літератури

біомаси) і жорстке регулювання діяльності людей у пожежонебезпечний період. Значна увага приділяється інформаційним кампаніям і обмеженням доступу до лісів у спекотні сезони. У разі виникнення пожеж їх ліквідація здійснюється комплексно: задіюються наземні пожежні підрозділи, авіація (літаки та гелікоптери для скидання води), а також міжнародна допомога через Механізм цивільного захисту ЄС, який дозволяє швидко перекидати техніку і рятувальників між країнами. Важливу роль відіграє координація на рівні ЄС і використання сучасних технологій прогнозування, що дозволяє локалізувати пожежі на ранніх стадіях і запобігати їх поширенню навіть за умов зростання кількості екстремальних пожеж у Європі.

Житомирська область належить до зони Українського Полісся і характеризується високим рівнем лісистості, значним поширенням торфових ґрунтів та підвищеною пожежною небезпекою у весняно-літній період. Порівняння існуючої системи попередження та гасіння пожеж у Житомирській області з європейськими підходами дозволяє визначити ключові відмінності та окреслити напрями підвищення ефективності управління пожежними ризиками в регіоні (табл. 4).

Для Житомирської області, як типового регіону Полісся, характерна підвищена вразливість до лісових і торф'яних пожеж, що потребує переходу від переважно реактивної моделі боротьби з поже-

жами до проактивної системи управління ризиками. Європейський досвід свідчить про ефективність комплексного підходу, який поєднує раннє виявлення пожеж, належне управління лісовими екосистемами, використання сучасних технологій та активну участь населення. Адаптація цих підходів у Житомирській області дозволить суттєво знизити частоту та масштаби пожеж, мінімізувати екологічні та економічні збитки, а також підвищити рівень екологічної безпеки регіону.

Висновки. Результати дослідження підтвердили, що лісові пожежі є одним із ключових чинників трансформації лісових екосистем Житомирського Полісся. Аналіз даних за 2005–2024 рр. показав значну мінливість пожежної активності з її зростанням після 2015 р., а у найбільш критичні роки кількість пожеж перевищувала середній багаторічний рівень більш ніж у 6 разів, тоді як площі, пройдені вогнем, збільшувалися у десятки разів. Встановлено, що найбільш пожежонебезпечними є соснові насадження на піщаних ґрунтах і торфові екосистеми, де пожежі мають тривалий характер і призводять до деградації ґрунтів, втрати органічної речовини та зниження продуктивності деревостанів. У післяпожежний період спостерігається зміна суцесійних процесів і формування вторинних березово-осикових лісів. Оцінка функціонування системи охорони лісів від пожеж засвідчила наявність значної матеріально-технічної бази, зокрема понад 190 лісових

**Європейські практики управління пожежними ризиками, доцільні для впровадження
в Житомирській області**

Напрямок управління пожежними ризиками	Зміст європейських практик	Результати впровадження
Раннє виявлення пожеж	Камери спостереження, дрони, супутниковий моніторинг	Оперативне виявлення загорянь
Прогнозування ризиків	Карти пожежної небезпеки, моделювання поширення	Попередження пожеж
Лісоуправління	Очищення лісів, створення протипожежних розривів	Зменшення поширення пожеж
Авіаційне гасіння	Використання літаків і гелікоптерів	Гасіння пожеж у важкодоступних районах
Освітні заходи	Інформаційні кампанії, підвищення екосвідомості	Зниження антропогенного фактору
Залучення громад	Добровільні пожежні формування	Швидке реагування на місцях
Міжнародна співпраця	Участь у програмах ЄС, обмін досвідом	Доступ до техніки та досвіду

Джерело: створено авторами

пожежних станцій, більш як 2300 одиниць спеціалізованої техніки та близько 460 спостережних веж. Це забезпечує відносно швидке реагування на загоряння, що підтверджується невеликою середньою площею однієї пожежі (близько 4,5 га у 2025 р.). Разом з тим встановлено, що система охорони лісів має переважно реактивний характер і потребує поси-

лення профілактичної складової. Підвищення ефективності управління пожежними ризиками можливе за рахунок впровадження дистанційного моніторингу, картування пожежної небезпеки та регулювання запасів горючих матеріалів, що дозволить зменшити масштаби пожеж і їх екологічні наслідки у лісових екосистемах регіону.

Література

1. 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. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.11.2025.29>
2. Іванюк Р.О., Мельник-Шамрай В.В. Лісові пожежі в Україні. Тези Всеукраїнської наукової конференції здобувачів вищої освіти та молодих учених «Екологічна безпека та раціональне природокористування», 14 листопада 2024 року. Житомир : Житомирська політехніка, 2024. С. 17.
3. Ігнатенко Т.Ю., Мельник-Шамрай В.В., Зинюк Н. М. Лісові пожежі як чинник деградації екосистем: причини, ризики та шляхи запобігання. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Поліські наукові читання – 2025», 02 – 04 грудня 2025 року. Чернігів, 2025. С. 197–201.
4. Ворон В.П., Кузик А.Д., Івашинюта С.В., Ціпан Ю.Р. Лісотипологічне оцінювання природної пожежної небезпеки лісів. *Наукові праці Лісівничої академії наук України*. 2024. Вип. 27. С. 76–84. <https://doi.org/10.15421/412415>
5. Zibtsev S. V., Soshenskyi O. M., Gumeniuk V. V., Koren V. A. Long-term dynamics of forest fires in Ukraine. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*. 2019. Vol. 10(3). С. 27–40. <http://dx.doi.org/10.31548/forest2019.03.027>
6. Zibtsev S.V., Soshenskyi O.M., Myroniuk V.V., Gumeniuk V.V. Wildfire in Ukraine: an overview of fires and fire management system. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*. 2020. Vol. 11(2). Р. 15–31. <https://doi.org/10.31548/forest2020.02.015>
7. Кузик А. Д. Лісові пожежі та їх екологічні аспекти. *Вісник ЛДУ БЖД*. 2010. № 4 (1). С. 124–128. <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/Visnuk/article/view/2129>
8. Кузик А. Кліматичні зміни, шкідники та хвороби лісу як чинники підвищення рівня пожежної небезпеки лісів. *Біологічні, хімічні та екологічні загрози під час війни*. 2025. С. 303–314. <https://doi.org/10.32447/bcet.2025.20>
9. Кузик А.Д. Еколого-лісівничі основи пожежної безпеки лісів Малого Полісся : монографія. Львів: Сполом. 2019. 493 с.
10. Сидоренко С.Г., Балабух В.О., Мельник С.Є. та ін. Оцінювання ймовірних змін пожежної небезпеки у лісах України в умовах зміни клімату. *Лісівництво і агролісомеліорація*. 2024. Вип. 145. С. 76–89. <https://doi.org/10.33220/1026-3365.145.2024.76>
11. Чорногор Л. Ф., Некос А. Н., Тітенко Г. В., Чорногор Л. Л. Екологічні наслідки великомасштабних лісових пожеж в Україні навесні – влітку – восени 2020 р. *Вісник ХНУ імені В. Н. Каразіна серія «Екологія»*. 2021. Вип. 24. С. 79–90. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2021-24-07>
12. Борис О. П. Удосконалення механізмів ліквідації великомасштабних лісових пожеж. *Екологічні науки*. 2021. № 3(36). С. 7–11. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.есо.3-36.1>
13. Пацева І., Барабаш О., Мельник-Шамрай В., Пацев І. Екологічна оцінка впливу пожеж у природних екосистемах на стан екологічної безпеки Житомирської області. *Проблеми хімії та сталого розвитку*. 2023. Вип. 3. С. 59–65. <https://doi.org/10.32782/pcsd-2023-3-8>

14. Пацев І. С., Барабаш О. В., Пацева І. Г. Вплив воєнних дій на лісові екосистеми Житомирщини. *Екологічні науки*. 2023. № 5(50). С. 114–118. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.есо.5-50.16>.
15. Мельник-Шамрай В.В., Гончарук В.М., Романюк О.О. Вплив російсько-української війни на ліси України. Сучасний стан, проблеми і перспективи лісівничої освіти, науки та виробництва: матеріали IV Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (Біла Церква, 19 квітня 2024 р.). Біла Церква: БНАУ, 2024. С. 169–171.
16. Давидова І. В., Корбут М. Б. Вплив лісових пожеж на вертикальний розподіл радіонуклідів у лісових ґрунтах. Лісові пожежі в умовах війни : збірник тез доповідей Круглого столу, м. Львів, 24 травня 2024 року. Львів: ЛДУ БЖД, 2024. С. 8–13.
17. Harrison S.P., Marlon J.R., Bartlein P.J. Fire in the Earth System. In: Dodson, J. (eds) *Changing Climates, Earth Systems and Society. International Year of Planet Earth. Springer, Dordrecht*. 2010. P. 21–48. https://doi.org/10.1007/978-90-481-8716-4_3
18. Dickinson, M.B., Ryan, K.C. Introduction: Strengthening the Foundation of Wildland Fire Effects Prediction for Research and Management. *Fire Ecology*. 2010. Vol. 6. P. 1–12. <https://doi.org/10.4996/fireecology.0601001>
19. Khabarov, N., Krasovskii, A., Obersteiner, M. et al. Forest fires and adaptation options in Europe. *Regional Environmental Change*. 2016. Vol. 16. 21–30. <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0621-0>
20. Canelles Q., Aquilué N., James P.M.A. et al. Global review on interactions between insect pests and other forest disturbances. *Landscape Ecology*. 2021. Vol. 36, P. 945–972. <https://doi.org/10.1007/s10980-021-01209-7>
21. Борис О.П. Удосконалення механізмів ліквідації великомасштабних лісових пожеж. *Екологічні науки*. 2021. № 3(36). С. 7–11. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.есо.3-36.1>
22. Зібцев С.В., Борсук О.А. Охорона лісів від пожеж у світі та в Україні – виклики XXI сторіччя та перспективи розвитку. *Лісове і садово-паркове господарство*. 2012. № 1. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/licgos_2012_1_7.
23. De Luis M, Baeza MJ, Raventós J, González-Hidalgo JC. Fuel characteristics and fire behaviour in mature Mediterranean gorse shrublands. *International Journal of Wildland Fire*. 2004. Vol. 13. P. 79–87. <https://doi.org/10.1071/WF03005>
24. Pais, S., Campos, J., Aquilué, N. et al. The role of fire as a restoration tool for biodiversity and fire regimes in abandoned mountain areas of southern Europe. *Fire Ecology*. 2025. Vol. 21. P. 65. <https://doi.org/10.1186/s42408-025-00422-y>
25. Публічний звіт голови державного агентства лісових ресурсів України за 2025 рік. URL: <https://forest.gov.ua/storage/app/sites/8/uploaded-files/publicnii-zvit-golovi-2025.pdf> (дата звернення 15.03.2026 р.).
26. Постанова Кабінет Міністрів України «Про затвердження Порядку організації охорони і захисту лісів». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/612-2022-%D0%BF#Text> (дата звернення 01.02.2026 р.).
27. Постанова Кабінет Міністрів України «Про затвердження Порядку обліку пожеж та їх наслідків». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2030-2003-%D0%BF#Text> (дата звернення 01.02.2026 р.).

Дата першого надходження статті до видання: 26.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

ОЦІНКА РІВНЯ ЗАБРУДНЕННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ ЗА ВМІСТОМ ШИРОКОГО СПЕКТРА КОНГЕНЕРІВ ПХБ У КОМПОНЕНТАХ ДОВКІЛЛЯ

Мідик С.В.¹, Сенін С.А.¹, Корнієнко В.І.¹, Семенко Л.О.¹, Хижняк С.В.¹,
Березовський О.В.¹, Полтавченко Т.В.², Ладугубець О.В.³

¹Національний університет біоресурсів і природокористування України
вул. Героїв Оборони, 15; 03041, м. Київ

²Національний університет водного господарства та природокористування
вул. Соборна, 11; 33000, м. Рівне

³Державний біотехнологічний університет
вул. Алчевських, 44, 61002, м. Харків
svit.mid@gmail.com

Досліджено процеси накопичення та розподілу конгенерів поліхлорованих біфенілів (ПХБ) у ґрунтах та донних відкладеннях (мулі) в умовах антропогенного навантаження. Метою роботи є кількісна та якісна оцінка вмісту широкого спектра конгенерів ПХБ у компонентах довкілля (на прикладі Івано-Франківської області) для визначення рівня екологічних ризиків та ідентифікації джерел забруднення. Вибір зразків здійснювався у лісових масивах, прибережних зонах річок Лембів і Дністер, а також поблизу автомагістралі Р24. Аналітичне визначення ПХБ проводили методом газової хроматографії з електронно-захоплюючим детектором (GC-ECD) на високоефективній капілярній колонці SGE HT8-PCB (60 м). Підготовку проб здійснювали відповідно до ДСТУ ISO 10382:2004 та за розробленою методикою, що забезпечило ефективну екстракцію цільових компонентів зі складних матриць. Ідентифікацію здійснювали для понад 130 конгенерів згідно з номенклатурою IUPAC із використанням внутрішнього стандарту (ПХБ № 209). Встановлено, що у більшості досліджених локацій вміст ПХБ відповідає фоновим значенням і не перевищує екологічні нормативи (0,05 мг/кг для ґрунтів). Проте, виявлено зони локального техногенного накопичення. Найвищі концентрації зафіксовано у ґрунті поблизу автодороги Р24 (сумарний вміст окремих конгенерів ПХБ-18, 27/15, 16 досягав 0,013 – 0,022 мг/кг) та у мулових відкладеннях р. Лембів (ПХБ-5/8 – 0,031 мг/кг). Аналіз профілю конгенерів свідчить про домінування три- та тетрахлорбіфенілів, що вказує на деградацію старих технічних сумішей та відсутність свіжих джерел викидів. Виявлені концентрації ПХБ у більшості зразків не перевищують нормативні показники (для ґрунтів – 0,05 мг/кг, для мулів – 0,1 мг/кг), що свідчить про допустимий рівень забруднення. Однак, наявність локальних піків свідчить про необхідність постійного екологічного моніторингу, особливо у прибережних зонах річки Лембів і поблизу автодороги Р24, де ймовірно накопичення техногенних органічних сполук. *Ключові слова:* поліхлоровані біфеніли, конгенери, ПХБ, GC-ECD, екологічний ризик, ґрунт, донні відкладення.

Assessment of the level of pollution and environmental risks based on the content of a broad spectrum of PCB congeners in environmental components Midyk S., Senin S., Korniyenko V., Semenko L., Khyzhnyak S., Berezovskyi O., Poltavchenko T., Ladogubets E.

The processes of accumulation and distribution of polychlorinated biphenyl (PCB) congeners in soils and bottom sediments (silt) under anthropogenic load were studied. The aim of the work is to quantitatively and qualitatively assess the content of a wide range of PCB congeners in environmental components (using the example of Ivano-Frankivsk region) to determine the level of environmental risks and identify sources of pollution. Samples were collected in forest areas, coastal zones of the Lembiv and Dniester rivers, as well as near the P24 highway. Analytical determination of PCBs was carried out by gas chromatography with electron capture detector (GC-ECD) on a high-performance capillary column SGE HT8-PCB (60 m). Sample preparation was carried out in accordance with DSTU ISO 10382:2004 and according to the developed methodology, which ensured effective extraction of target components from complex matrices. Identification was carried out for more than 130 congeners according to the IUPAC nomenclature using an internal standard (PCB No. 209). It was found that in most of the studied locations the PCB content corresponds to background values and does not exceed environmental standards (0.05 mg/kg for soils). However, zones of local technogenic accumulation were detected. The highest concentrations were recorded in the soil near the P24 highway (the total content of individual congeners PCB-18, 27/15, 16 reached 0.013 – 0.022 mg/kg) and in the silt deposits of the Lembiv River (PCB-5/8 – 0.031 mg/kg). Analysis of the congener profile indicates the dominance of tri- and tetrachlorobiphenyls, which indicates the degradation of old technical mixtures and the absence of fresh emission sources. The detected PCB concentrations in most samples do not exceed the regulatory indicators (for soils – 0.05 mg/kg, for silts – 0.1 mg/kg), which indicates an acceptable level of contamination. However, the presence of local peaks indicates the need for constant environmental monitoring, especially in the coastal areas of the Lembiv River and near the P24 highway, where the accumulation of man-made organic compounds is likely. *Key words:* polychlorinated biphenyls, congeners, PCBs, GC-ECD, environmental risk, soil, bottom sediments.



Постановка проблеми. Хімічні сполуки, виявлені в навколишньому середовищі, для яких характерним є тривалий період напіврозпаду в ґрунтах (зазвичай роки), донні відкладення водою, повітрі (кілька днів) або біоті, визначаються як стійкі органічні забруднювачі (СОЗ). В останні роки кількість досліджень впливу СОЗ на екосистеми зростає, і ця тема стала важливою і захопливою галуззю наукових досліджень [1, 2].

Кілька СОЗбуловнесено до списку Стокгольмської конвенції про стійкі органічні забруднювачі, до яких відносяться: хлоровані (та бромовані) ароматичні сполуки (серед них поліхлоровані біфеніли (ПХБ)), поліхлоровані дибензофурані, полібромовані дифенілові ефіри, ряд хлорорганічних пестицидів (наприклад, дихлордифенілтрихлорметилметан (ДДТ) та його метаболіти (хлордан, токсафен) [3].

Актуальність дослідження. Наукові дослідження свідчать про те, що екологічний та професійний вплив високих концентрацій ПХБ пов'язаний зі шкідливими наслідками для здоров'я, такими як нейропсихологічні та нейроповедінкові порушення, дисфункції імунної системи, деменція, серцево-судинні захворювання репродуктивні та онкологічні захворювання [4, 5].

Тому оцінка забруднення ґрунтів поліхлорованими біфенілами, особливо під час військових дій є важливим завданням.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Важливою екологічною проблемою є забруднення довкілля токсичними речовинами. До них відносяться поліхлоровані біфеніли. Це дослідження сприяє також розробці нових методів контролю екологічного моніторингу довкілля.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Різноманітні комбінації поліхлорованих біфенілів визначаються кількістю і положенням атомів хлору і призводять до утворення 209 різних сполук, які називаються конгенерами. Хімічні та фізичні властивості ПХБ суттєво відрізняються залежно від конгенеру, що зумовлює їх високу структурну мінливість [6].

ПХБ відносяться до СОЗ через їхню високу стійкість, здатність до біоаккумуляції та токсичності. Через свою мобільність та стабільність у навколишньому середовищі, вони розповсюджені по всій планеті: від Арктики Антарктики до антарктики і навіть Маріанської западини у глибинах Тихого океану. Тому ПХБ становлять ризик для екосистем, оскільки вони інтенсивно біоакмулюються через харчові ланцюги, досягаючи небезпечних рівнів у тварин верхніх трофічних рівнів. Як наслідок, вони можуть впливати не лише на окремі організми, а й, зрештою, на цілі екосистеми [7].

Аналізуючи методи визначення поліхлорованих біфенілів (ПХБ) слід відзначити GC/MS метод [8] з рекомендованою пробопідготовкою QuEChERS

[9]. Вона дозволяє швидко та ефективно проводити екстракцію залишкових кількостей цільових компонентів та очищення екстракту від компонентів матриці [10]. В окремих дослідженнях за допомогою цього методу екстрагують ПХБ з ґрунту [11].

При визначенні ПХБ також використовують GC-ECD метод, повернення якого складає 95,7-101% [12].

У науковій літературі та в офіційних нормативних документах описано різні варіанти методів визначення PCBs. Одним з них є метод, який передбачає визначення 19-ти PCBs у твердих матрицях за використання капілярних хроматографічних колонок (30 м) різного діаметру. Етапи пробопідготовки при визначенні 19 конгенерів PCB можуть використовуватися для аналізування та ідентифікації інших конгенерів, але усі 209 конгенерів PCB не можливо ідентифікувати за допомогою хроматографічних колонок та аналітичних процедур, описаних у цьому методі [13, 14, 15].

Також існують різні методи екстрагування твердих зразків для визначення в них PCBs, які зазначені в офіційних методах [16-19].

При проведенні хроматографування методами GC/ECD застосовують капілярні колонки з внутрішнім діаметром 0.25 мм, 0.32 мм або 0.53 мм. Колонки з меншим діаметром мають більшу хроматографічну роздільну здатність, ніж колонки з більшим внутрішнім діаметром. Хроматографічні колонки з меншим внутрішнім діаметром (0.25 мм) та великою довжиною (>60 м), як правило, можуть бути ефективніші для розділення більшої кількості конгенерів PCBs.

У науковій літературі [20] описано багатоетапну підготовку проб жиромісних матриць для аналізування GC/ECD, яка включає 24-х годинне екстрагування проб на апараті Soxhlet, випарювання на ротаційному випарнику, центрифугування та концентрування проби потоком азоту за використання таких реактивів як сульфат натрію, сірчана кислота, гексан, дихлорметан. Відомі також інші методи визначення PCBs, які характеризуються як перевагами так і недоліками [21].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Проведено якісне та кількісне визначення конгенерів поліхлорованих біфенілів у компонентах екосистем західної України.

Новизна. Вперше досліджено донні відкладення річок Леваць і Дністер і та ґрунт територій західної України в Івано-Франківській області на наявність більш як 130-ти конгенерів поліхлорованих біфенілів.

Виклад основного матеріалу. Методи визначення поліхлорованих біфенілів поділяються на:

- 1) скринінгові методи (біоаналітичні методи та методи газової хроматографії з мас-спектрометричним детектуванням);
- 2) підтверджуючі методи (метод газової хроматографії з мас-спектрометрією високої роздільної здат-

ності та метод газової хроматографії з тандемним мас-спектрометричним детектуванням.

У зразках ґрунтів (відібраних у лісах та біля автодороги) та мулу відібраних в районі річок Левець і Дністер в Івано-Франківській області визначали поліхлоровані біфеніли. Підготовку проб здійснювали відповідно до ДСТУ ISO 10382:2004 [22], а також за модифікованим методом підготовки проб, який розроблений в Українській лабораторії якості і безпеки продукції АПК НУБіП України. Порядок елюювання ПХБ визначали згідно технічної специфікації виробника (Trajan Scientific and Medical) колонки SGE HT8-PCB (60 м × 0,25 мм, part number 054236). Найменування ПХБ (номер, структура) зазначали згідно номенклатури IUPAC (Міжнародний союз фундаментальної та прикладної хімії). Для ідентифікації ПХБ у пробах використовували аналітичні стандарти ПХБ 14 для ECD 10 мг/мл у гептані; Арохлори 1242, 1254, 1254, 1260 в концентрації 1000 мкг/мл в ізооктані (аналітичні стандарти), а також аналітичний стандарт ПХБ № 209, в концентрації 10 мкг/мл в ізооктані та аналітичний стандарт ПХБ № 30 (10 мкг/мл) в ізооктані. Обрахунок результатів ПХБ проводили методом внесення внутрішнього стандарту в кожену пробу. В якості внутрішнього стандарту використовували аналітичний стандартний розчин PCB № 209 в ізооктані. Межу кількісного визначення (LOQ) розраховано для кожного ПХБ окремо. Вона визначається як масова частка компоненту, яка дає сигнал (площу піка), що у 10 разів перевищує сигнал проби контролю аналізованої матриці.

Дослідження проводили з метою кількісного та якісного визначення поліхлорованих біфенілів у про-

бах методом газової хроматографії з електронно-захоплюючим детектором. При аналізі отриманих даних ми ідентифікували окремі поліхлоровані біфеніли відповідно до номенклатури IUPAC у порядку їх елюювання. Проби були досліджені на наявність більше 130 конгенерів ПХБ. В таблиці 1 наведені результати визначення 14 основних конгенерів ПХБ із зазначенням меж кількісного визначення та розширеної невизначеності вимірювань.

За результатами аналізу встановлено, що більшість конгенерів ПХБ у зразку Мул 1 (р. Левець) не перевищують межі кількісного визначення (<LOQ). Зокрема, для ПХБ-10, 4, 9, 7, 18, 24, 32 та 34 концентрації не досягають аналітичної чутливості методу, що свідчить про наявність у кількості слідів.

Але для шести показників таких як ПХБ-6, ПХБ-5/8, ПХБ-19, ПХБ-17, ПХБ-27/15 та ПХБ-16 відмічено концентрацію у межах 0,002–0,012 мг/кг, які перевищують межу кількісного визначення. Найвищу концентрацію виявлено для ПХБ-5/8 (2,3; 2,4') – 0,012 мг/кг з розширеною невизначеністю 0,005 мг/кг.

Виявлені показники належать переважно до трихлор- та тетрахлорбіфенілів, які мають меншу термічну та біохімічну стійкість, порівняно з високохлорованими ПХБ. Це свідчить про наявність залишкового, а не свіжого джерела забруднення.

Загальний вміст ПХБ у дослідженому зразку не перевищує 0,05 мг/кг, що є нижчим за допустимі норми, регламентовані міжнародними стандартами, 0,1–0,5 мг/кг для ґрунтів і донних відкладів.

Таким чином, фоновий рівень ПХБ у зразку Мул 1 (р. Левець) є низьким, а екологічна небезпека – мінімальною. Виявлені концентрації пере-

Таблиця 1

Вміст поліхлорованих біфенілів (ПХБ) в залежності від місця відбору

№ піка	№ ПХБ (IUPAC)	Структура	Мул 1 р. Левець	Мул 2 р. Левець	Мул р. Дністер	Мул р. Левець 3	Ґрунт р. Левець 4	Ґрунт лісовий	Ґрунт автодорога Р24	Ґрунт (поле, 300 м від Р24)	LOQ, мг/кг
1	10	2,6	<0,003	<0,003	0,004	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	0,003
2	4	2,2'	<0,019	<0,019	<0,019	<0,019	<0,019	<0,019	<0,019	<0,019	0,019
3	9	2,5	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0,002	<0,002	<0,002	0,002
4	7	2,4	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,001
5	6	2,3'	0,008	<0,002	<0,002	0,003	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0,002
6	5;8	2,3; 2,4'	0,012	<0,005	<0,005	0,031	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,005
7	19	2,2',6	0,007	0,005	<0,003	0,004	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	0,003
8	18	2,2',5	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	0,018	<0,003	0,003
9	17	2,2',4	0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0,007	<0,002	0,002
10	24	2,3,6	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,007	<0,001	0,001
11	27;15	2,3',6; 4,4'	0,009	0,002	<0,002	<0,002	0,002	0,002	0,022	<0,002	0,002
12	32	2,4',6	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	0,003
13	16	2,2',3	0,008	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0,013	<0,002	0,002
14	34;29	2',3,5; 2,4,5	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,001

бувають у межах аналітичної похибки методу, що підтверджується малими значеннями розширеної невизначеності (0,001–0,005 мг/кг).

При аналізі Мул 2 р. Левець основні концентрації ПХБ були на рівні межі кількісного визначення. Тільки наявність конгенерів ПХБ-19 (2,2',6) перевищувала допустимі та становили 0,005 мг/кг.

У пробі Мул Левець-3 вміст ПХБ-5;8 досягнув 0,031 мг/кг, що є найвищим показником серед усіх мулових проб і свідчить про локальне накопичення ПХБ у донних відкладах. Що пов'язано з неорганізованим скиданням стоків або іншого забруднення. При аналізі показників Мул річки Дністер всі показники конгенерів ПХБ були нижчі за межу кількісного визначення. Лише ПХБ-10 (2,6) виявлено у кількості 0,004 мг/кг, що свідчить про незначне, фонове забруднення.

Відібрані зразки ґрунту біля річки Левець-4 та зразок з лісовим ґрунтом містили лише сліди ПХБ, окремі показники на рівні межі виявлення (0,002 мг/кг для ПХБ-27;15). А от ґрунт відібраний біля автодороги Р24 мав найвищі концентрації серед усіх проб і становив: ПХБ-18 (2,2',5) – 0,018 мг/кг; ПХБ-17 (2,2',4) – 0,007 мг/кг; ПХБ-24 (2,3,6) – 0,007 мг/кг; ПХБ-27;15 (4,4'; 2,3',6) – 0,022 мг/кг; ПХБ-16 (2,2',3) – 0,013 мг/кг.

Це вказує на вплив антропогенного фактору, зокрема транспортних викидів, мастил. У зразку ґрунту з поля (300 м від автодороги) концентрації всіх конгенерів були нижчими та в межах допустимості. Таким чином, автодорожній фактор виступає одним із головних шляхів техногенного надходження біфенілів у ґрунт. Це свідчить про добрий екологіч-

ний стан середовища та низький рівень трансформації органічних забруднювачів.

Узагальнюючи отримані показники можна стверджувати, що поліхлоровані біфеніли належать до стійких органічних забрудників (СОЗ), які можуть акумулюватися в донних відкладах і ґрунтах, мігрувати у водне середовище та включатися в харчові ланцюги.

Навіть при невеликих концентраціях вони характеризуються біоаккумулятивною здатністю, токсичністю для водних організмів та канцерогенним ефектом при тривалому впливі на людину. Виявлені концентрації ПХБ у більшості зразків не перевищують нормативні показники (для ґрунтів – 0,05 мг/кг, для мулів – 0,1 мг/кг), що свідчить про допустимий рівень забруднення.

Однак наявність локальних піків свідчить про необхідність постійного екологічного моніторингу, особливо у прибережних зонах річки Левець і поблизу автодороги Р24, де ймовірно накопичення техногенних органічних сполук.

Головні висновки та перспективи використання результатів дослідження. Доведено, що головними чинниками антропогенного надходження ПХБ у регіоні є транспортні викиди та неорганізовані стоки у прибережні захисні смуги. Розроблений аналітичний підхід дозволяє проводити прецизійний моніторинг стійких органічних забрудників, що є критично важливим для оцінки екологічної безпеки територій в умовах військового стану та поствоєнного відновлення. Результати можуть бути використані для розробки стратегій рекультивації забруднених земель та ведення державного екологічного моніторингу.

Література

1. Pironti C., Ricciardi M., Proto A., Bianco P.M., Montano L., Motta O. Endocrine-Disrupting Compounds: An Overview on Their Occurrence in the Aquatic Environment and Human Exposure. *Water*. 2021. Vol. 13. P. 1347. DOI:10.3390/w13101347
2. Vasseghian Y., Hosseinzadeh S., Khataee A., Dragoi E.-N. The Concentration of Persistent Organic Pollutants in Water Resources: A Global Systematic Review, Meta-Analysis and Probabilistic Risk Assessment. *Sci. Total Environ.* 2021. Vol. 796. P. 149000. DOI:10.1016/j.scitotenv.2021.149000
3. Lallas P.L. The Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. *American Journal of International Law*. 2001. Vol. 95(3). P. 692-708. doi:10.2307/2668517.
4. Montano L., Pironti C., Pinto G., Ricciardi M., Buono A., Brogna C., Venier M., Piscopo M., Amoresano A., Motta O. Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in the Environment: Occupational and Exposure Events, Effects on Human Health and Fertility. *Toxics*. 2022. Vol. 10(7). P. 365. DOI:10.3390/toxics10070365
5. Войціцький В.М., Корнієнко В.І., Хижняк С.В., Мідик С.В., Самкова О.П., Якубчак О.М., Ладогубець О.В. Участь адаптивного потенціалу біологічних систем у формуванні їх надійності. *Екологічні науки*. 2024. № 1(52), Том 2. С. 119-122. DOI:10.32846/2306-9716/2024.eco.1-52.2.22
6. Grimm F.A., Hu D., Kania-Korwel I., Lehmler H.-J., Ludewig G., Hornbuckle K.C., Duffel M.W., Bergman Å., Robertson L.W. Metabolism and Metabolites of Polychlorinated Biphenyls. *Crit. Rev. Toxicol.* 2015;45:245–272. DOI: 10.3109/10408444.2014.999365
7. Zhou Z., Wei T., Zhou J., Wang Z., Cui M., Tang J., Han J., Zhang Z., Qiao X. Dechlorination-Oxypyrolysis Coupled Treatment of Polychlorinated Biphenyls: Reaction Process, Degradation Pathway, and Cost Analysis. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2026. Vol. 65 (7). P. 3677-3693. DOI:10.1021/acs.iecr.5c04641
8. Левчук І.В. Визначення поліхлорованих біфенілів (ПХБ) в оливах та жирах. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2014. Vol. 1. P. 113–120.
9. Ostadgholami M., Zeeb M., Amirahmadi M., Daraei B. Multivariate Optimization and Validation of a Modified QuEChERS Method for Determination of PAHs and PCBs in Grilled Meat by GC-MS. *Foods*. 2024. Vol. 13. P. 143. DOI: 10.3390/foods13010143
10. Senin S. A., Midyk S. V., Kornienko V. I., Konovalova O. Yu., Berezovskiy O. V., Ladohubets E. V., Harkusha I. V. Determination of Mycotoxins in Wheat Grain by LC-MS/MS using Modified QuEChERS Sample Preparation. *Methods and Objects of Chemical Analysis*. 2023. Vol. 18. Issue 1. P. 22–28. DOI: 10.17721/moca.2023.22-28

11. Alsefri S., Balbaied T., Alatawi H., Albalawi I., Hogan A., Moore E. Development of the QuEChERS Extraction Method for the Determination of Polychlorinated Biphenyls (Aroclor 1254) in Soil Samples by Using GC-MS. *Separations*. 2023. Vol. 10. P. 250. DOI: 10.3390/separations10040250
12. Afful S., Awudza J.A.M., Twumasi S.K., Osae S. Determination of indicator polychlorinated biphenyls (PCBs) by gas chromatography–electron capture detector. *Chemosphere*. 2013. Vol. 93. Issue 8. P. 1556–1560. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.08.001
13. Скринник М.М. Визначення хлорорганічних пестицидів та поліхлорованих біфенілів у гідробіонтах методом хромато-мас-спектрометрії. Автореф. дис. на здоб. ступ. канд. 02.00.02 – аналітична хімія. Ужгород, 2017. 25 с. <https://www.uzhnu.edu.ua/uk/infocentre/get/11325>
14. Method 8082A. Polychlorinated biphenyls (PCBs) by gas chromatography
15. ДСТУ 4514:2006 Риба, інші прісноводні ресурси та харчові продукти з них. Виявлення хлорорганічних пестицидів та поліхлорованих біфенілів методом газорідинної хроматографії
16. Method 3540C (Soxhlet extraction) <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/3540c.pdf>
17. Method 3541 (automated Soxhlet) <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/epa-3541.pdf>
18. Method 3545 (pressurized fluid extraction) <https://docplayer.net/21030333-Method-3545-pressurized-fluid-extraction-pfe.html>
19. Method 3546 (microwave extraction) <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/3546.pdf>
20. Grafton A., Lee D., Libero D., Miller J., Rapko K. Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Fish Roe. *Journal of Young Investigators*. 2006. Vol. 1.
21. Liu J., Li G., Liu J., Wang P., Wu D., Zhang X., & Wu Y. Recent Progress on Toxicity and Detection Methods of Polychlorinated Biphenyls in Environment and Foodstuffs. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*. 2023. Vol. 53. Issue 4, pp. 928–953. DOI:10.1080/10408347.2021.1997570
22. ДСТУ ISO 10382:2004 Проект. Якість ґрунту. Визначення хлорорганічних пестицидів та поліхлорбіфенілів. Газово-хроматографічний метод з детекцією захопленням електронів (ISO 10382:2002(E), IDT).

Дата першого надходження статті до видання: 23.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

IMPLEMENTATION OF AN AUTONOMOUS SELF-EVOLVING AND SELF-HEALING ALGORITHM FOR AI-ORCHESTRATED HYBRID POLLUTION MODELS IN REAL-TIME ROADSIDE POLLUTION CONTROL SYSTEMS

Prykhodko K.V.

Kharkiv National Automobile and Highway University
Yaroslava Mudrogo St, 25, 61002, Kharkiv, Ukraine
kyrylo.prykhodko1410@gmail.com

This paper presents the full-scale implementation and four-month production operation of the autonomous self-evolving and self-healing mode (activated 1 November 2025) of an algorithm that dynamically orchestrates four hybrid pollution dispersion models (LZA, ADBMS-Light, improved Gaussian with terrain and chemistry, and hybrid Gaussian-Lagrangian with Monte Carlo particle tracking) for real-time roadside ecosystem safety management. Powered by a six-agent multi-agent system on Azure OpenAI and tightly integrated with a central MCP (Modular Computation Platform) Tool Registry Server, the algorithm continuously discovers new tools, autonomously creates and registers entirely new ecological-specific tools, maintains 100% test coverage across specialized tests, and performs zero-downtime blue/green deployments. Through the MCP registry the system automatically recognizes the expected control behavior (alerting drivers or activating active purification means) and integrates both alerting and control tools. The ecological reward functions are built strictly around real roadside metrics: time to return to maximum permissible concentrations (MPC), shrinkage of red danger zones on GIS maps, and impact on seasonal roadside vegetation. Agent «Kiro» (programmer) operates in two modes: reactive (on anomaly or test fail) and proactive (in the last 72 hours of each billing period). The system is designed to support multiple large language models with free quotas. Although today Azure OpenAI remains the most advantageous option due to its stability and quality, the architecture is ready to dynamically switch to any other provider (Gemini, Claude etc.) that currently offers larger remaining free credits. Using only the remaining free credits of the most beneficial provider at the moment – typically 8-15 out of 50 – Agent Kiro creates planned improvements or new tools. Field results on highways M03, E40, and P02 (Kharkiv region, November 2025 – February 2026) demonstrate 99.7% uptime, modest but steady additional 8.8% RMSE reduction purely from self-evolution cycles, 7% faster time to MPC recovery, 9% reduction in red-zone area, and full compliance with Ukrainian and WHO standards. Only three major new tools were created by Agent Kiro during the entire period. The developed system represents the final practical implementation stage before the PhD thesis defense on integration of ecological safety control tools for roadside ecosystems and is ready for nationwide scaling. *Key words:* self-evolving algorithm, multi-agent AI, MCP Tool Registry, roadside pollution dispersion, active control tools, 100% ecological test coverage, blue/green deployment, credit-aware proactive evolution, hybrid Gaussian-Lagrangian model

Впровадження автономного саморозвивального та самовідновлюваного алгоритму для гібридних моделей забруднення, керованих штучним інтелектом, у системах контролю забруднення на узбіччі доріг у режимі реального часу. Приходько К.В.

Реалізація автономного самоадаптивного та самовідновлюваного алгоритму для автоматизованого оркестрування гібридних моделей розсіювання забруднення в системах управління екологічною безпекою узбіччя автомобільних доріг у реальному часі. У цій статті представлено повномасштабну реалізацію та чотиримісячну виробничу експлуатацію (з 1 листопада 2025 року) автономного режиму саморозвитку та самовідновлення алгоритму, який динамічно оркеструє чотири гібридні моделі розсіювання забруднення (LZA, ADBMS-Light, удосконалена гауссівська модель з урахуванням рельєфу та хімічних процесів, а також гібридна гауссівсько-лагранжева модель з відстеженням частинок методом Монте-Карло) для управління безпекою екосистем узбіччя автомобільних доріг у реальному часі. Алгоритм, що працює на базі шестиагентної багатоагентної системи Azure OpenAI та тісно інтегрований з центральним сервером реєстру інструментів MCP (Modular Computation Platform), постійно виявляє нові інструменти, автономно створює та реєструє повністю нові екологічно-специфічні інструменти, забезпечує 100 % тестове покриття спеціалізованих тестів і виконує розгортання blue/green без простою. Завдяки реєстру MCP система автоматично розпізнає очікувану поведінку керування (оповіщення водіїв або активацію засобів активного очищення повітря) та інтегрує як інструменти оповіщення, так і інструменти керування. Екологічні функції винагороди побудовані виключно на реальних дорожніх метриках: часі повернення концентрацій до максимально допустимих концентрацій (МДК), зменшенні площі червоних зон небезпеки на картах ГІС та впливу на сезонну рослинність узбіччя. Агент «Кіро» (програміст) працює у двох режимах: реактивному (при виявленні аномалії або невдачі тесту) та проактивному (лише в останні 72 години кожного розрахункового періоду). Система спроектована для підтримки кількох великих мовних моделей з безкоштовними квотами. Хоча сьогодні Azure OpenAI залишається найбільш вигідним варіантом завдяки стабільності та якості, архітектура готова динамічно перемикається на будь-якого іншого провайдера (Gemini, Claude тощо), який наразі пропонує більший залишок безкоштовних кредитів. Використовуючи лише залишок безкоштовних кредитів найбільш вигідного провайдера (зазвичай 8-15 із 50), агент Кіро створює заплановані вдосконалення або нові інструменти. Результати польових випробувань на автомагістралях М03, Е40 та Р02 (Харківська область, листопад 2025 – лютий 2026 рр.) демонструють 99,7



% безперервної роботи, скромне, але стабільне додаткове зниження RMSE на 8,8 % виключно завдяки циклам саморозвитку, на 7 % швидше повернення до МДК, зменшення площі червоних зон на 9 % та повну відповідність українським нормативам і стандартам ВООЗ. За весь період агент Kіro створив лише три основні нові інструменти. Розроблена система є завершальним практичним етапом підготовки до захисту дисертації на здобуття ступеня доктора філософії з інтеграції інструментів контролю екологічної безпеки екосистем узбіччя доріг і повністю готова до масштабування на національному рівні. *Ключові слова:* алгоритм саморозвитку, багатоагентний ІІІ, реєстр інструментів MCP, дисперсія забруднення узбіччя доріг, інструменти активного керування, 100 % екологічне тестове покриття, розгортання blue/green, проактивна еволюція з урахуванням кредитів, гібридна гауссівсько-лагранжева модель

Problem statement. Roadside ecosystems along major highways are exposed to constant and multifaceted pressures from vehicle emissions of fine particulate matter (PM_{2.5}), nitrogen dioxide (NO₂), and carbon monoxide (CO). These pressures are compounded by highly variable meteorological conditions, complex terrain features, seasonal changes in plant cover, and specific wartime operational constraints, including civilian drone bans that force reliance on manual terrain surveys and occasional instability in IoT data streams. Previous static orchestration of pollution dispersion models proved insufficient for maintaining long-term accuracy and reliability under rapidly changing ecological conditions. Manual updates to model parameters or code were too slow, labor-intensive, and costly, creating a critical need for an autonomous system capable of continuous adaptation without human intervention.

Relevance of the study. Real-time roadside ecosystem safety management is crucial for compliance with Ukrainian national standards and WHO air quality guidelines. The development of adaptive systems is particularly relevant given the instability of infrastructure and the need for precise ecological monitoring under wartime conditions. Transforming passive monitoring platforms into closed-loop ecological safety systems capable of active intervention (alerting drivers, activating purification means) addresses an urgent practical necessity. Furthermore, ensuring that such advanced AI systems operate without additional financial costs through credit-aware strategies enhances their viability for widespread deployment in resource-constrained environments.

The connection of the author's contribution with important scientific and practical tasks. The developed system represents the final practical implementation stage before the PhD thesis defense on the integration of ecological safety control tools for roadside ecosystems. The research directly supports the task of nationwide scaling across the entire Ukrainian road network. By integrating ecological safety control tools with autonomous self-evolution mechanisms, the authors address the scientific task of creating living computational ecosystems that grow together with the environment they protect. Practically, the system enables immediate deployment on highways to reduce health risks associated with pollution spikes near schools and residential areas.

Analysis of recent studies and publications. Previous research conducted by the authors successfully developed and field-validated four hybrid dispersion models of progressively increasing complexity: Linear

Zone Approximation (LZA), ADBMS-Light, improved Gaussian, and hybrid Gaussian-Lagrangian models. Contemporary developments in dispersion modeling include adaptive and hybrid optimization approaches consistent with real-time air quality systems. Recent studies have explored hybrid quantum-classical and advanced neural network approaches for air quality prediction, including data-driven time-series prediction based on deep learning architectures such as BLSTM. Traditional static modeling platforms such as SimScale or AERMOD provide measurably less long-term accuracy and adaptability compared to autonomous solutions. Comparative studies of dispersion models for roadside ecosystems highlight the benefits of hybrid particle-puff formulations validated in roadside conditions.

Identification of previously unresolved parts of the overall problem addressed in this article. Despite previous advancements, several critical gaps remained unresolved. Static orchestration was insufficient for maintaining accuracy under rapidly changing ecological conditions typical of Ukrainian highways. There was a lack of autonomous self-healing modes capable of detecting ecological anomalies and improving orchestration logic without human input. Additionally, existing systems lacked tight integration with a central tool registry that enables automatic discovery and autonomous creation of ecological-specific tools. Finally, the high cost of AI-driven self-improvement remained a barrier, as previous architectures did not utilize a credit-aware strategy to ensure cost-free evolution using remaining free quotas of LLM providers.

The novelty of the study lies. The core innovations distinguishing this work are fourfold. First, a six-agent multi-agent chat system operates on Azure OpenAI with function calling, guided by carefully designed ecological-specific reward functions. Second, tight integration with a central MCP (Modular Computation Platform) Tool Registry Server enables automatic discovery of externally provided tools as well as autonomous creation and registration of entirely new ecological tools by the system itself. Third, a comprehensive testing framework consisting of specialized tests guarantees 100% code coverage and 100% ecological coverage of all relevant roadside scenarios. Fourth, a credit-aware proactive evolution mode ensures that all self-improvements remain completely cost-free by utilizing only the remaining free Azure OpenAI credits in the final 72 hours of each monthly billing period.

Methodological or general scientific significance. The study introduces six ecological-specific self-evolu-

tion algorithms: reinforcement learning using Proximal Policy Optimization (PPO) with weighted ecological indicators; Bayesian optimization with a Gaussian Process surrogate model for tuning dispersion parameters; evolutionary strategies using a $(\mu + \lambda)$ evolution strategy for tool combination discovery; an adaptive Monte Carlo self-correction loop for turbulence changes; physics-informed neural network (PINN) meta-learning for residual correction; and concept drift detection using the Page-Hinkley statistical test. Methodologically, the implementation of Continuous Deployment (CD) with Blue/Green and Canary strategies for ecological models ensures zero-downtime releases. The comprehensive testing framework covers unit, integration, regression, load, chaos, ecological compliance, seasonal, active control, security, credit-aware, mutation, and end-to-end testing, setting a new standard for reliability in safety-critical ecological applications.

Presentation of the main material. Roadside The platform builds upon four hybrid pollution dispersion models previously developed and field-validated by the authors along highways M03, E40, and P02: the Linear Zone Approximation (LZA), ADBMS-Light, the improved Gaussian model with terrain and chemistry corrections, and the hybrid Gaussian-Lagrangian model with Monte Carlo particle tracking. These models were initially orchestrated statically. To overcome the limitations of static orchestration under highly variable meteorological conditions, complex terrain, seasonal vegetation dynamics, and wartime operational constraints (including the civilian drone ban that forced reliance on manual Leica TS07 surveys), the fully autonomous self-evolving and self-healing mode was activated on 1 November 2025 [1, 2].

The core of continuous improvement is a six-agent multi-agent system powered by Azure OpenAI with function calling, tightly integrated with the central MCP (Modular Computation Platform) Tool Registry Server [3]. The MCP registry provides automatic discovery of external tools, secure self-registration of newly created ecological-specific tools, full versioning with rollback, sandbox execution, and seamless provision of both alerting tools (driver mobile notifications and SCADA alarms) and active control tools (Roadside Air Purifiers and Roadvent curb-integrated systems). This bidirectional integration transforms the platform from passive forecasting into a closed-loop ecological safety system capable of active pollution mitigation.

Self-evolution is driven by six complementary mechanisms specifically tailored to the dynamic nature of roadside ecosystems (terrain effects, traffic-induced turbulence, seasonal vegetation buffers, and data-stream instability under wartime conditions). These mechanisms operate under strictly ecological reward functions based on real roadside metrics. The primary reward function used within Proximal Policy Optimization (PPO) is defined as:

$$R = \omega_1 \left(1 - \frac{RMSE}{RMSE_0}\right) + \omega_1 \left(1 - \frac{T_{MPC}}{T_{MPC,0}}\right) + \omega_1 \left(1 - \frac{A_{red}}{A_{red,0}}\right) + b_1 B_{season} + b_2 B_{tool} \quad (1)$$

where RMSE is the root mean square error of pollution predictions, T_{MPC} is the time required for concentrations to return to maximum permissible levels after a spike, A_{red} is the area of red danger zones on GIS maps, subscript 0 denotes baseline (pre-improvement) values, B_{season} and B_{tool} are bonus terms rewarding improved seasonal performance and successful integration of new MCP tools, and ω_i , b_j are weighting coefficients [4].

The six mechanisms are:

1. PPO-based reinforcement learning – optimizes model orchestration and tool selection using the multi-component ecological reward.
2. Bayesian optimization with Gaussian Process surrogate – efficiently tunes dispersion parameters (σ , κ , λ) against live sensor data.
3. $(\mu + \lambda)$ evolutionary strategies – discovers optimal combinations of MCP tools and model modules through population-based fitness evaluation.
4. Adaptive Monte Carlo self-correction loop – dynamically adjusts turbulence modeling in response to detected changes in wind or traffic-induced fluctuations.
5. Physics-informed neural network (PINN) meta-learning – learns and corrects systematic residuals of the hybrid models from recent roadside observations.
6. Page-Hinkley concept drift detection – identifies seasonal or traffic-induced shifts and triggers creation of specialized model variants [5].

All proposed changes are executed only after passing a comprehensive multi-layered test suite that guarantees 100% code coverage and 100% ecological coverage across relevant roadside scenarios, with no regression in key performance metrics.

A typical self-evolution cycle is triggered every 15 minutes or immediately upon anomaly detection. Agent Monitor ingests real-time IoT and GIS data, Agent Analyzer computes the ecological reward, Agent Ecologist provides roadside-specific interpretation, and Agent Model Optimizer applies the appropriate evolution mechanisms. After validation by Agent Tester, Agent Kiro generates code or new tools. Approved updates are deployed using zero-downtime Blue/Green strategy, with Canary rollout (initially 10% of traffic) applied for major modifications.

The system implements a strictly credit-aware proactive evolution mode. Major improvements and creation of new tools by Agent Kiro occur exclusively during the final 72 hours of each billing period, using only the remaining free credits (typically 8-15 out of 50) of the currently most advantageous LLM provider (primarily Azure OpenAI, with architecture ready to dynamically switch to Gemini, Claude or other providers offering larger remaining quotas) [6]. This approach ensures

Table 1

Performance before and after self-evolution (average values, November 2025 – February 2026)

Metric	Before (static orchestration)	After self-evolution	Improvement
RMSE (PM2.5)	1.02 µg/m ³	0.93 µg/m ³	8.8%
Time to MPC recovery	47 min	43.7 min	7%
Red danger zone area	12.4 ha	11.3 ha	9%
Computation time	2.1 min	1.95 min	7%
Uptime	97.2%	99.7%	+2.5%
Test coverage	89%	100%	+11%
New MCP tools created by Kiro	1	3	+300%

completely cost-free self-evolution while preserving high-quality code generation for ecological applications.

Over four months of uninterrupted production operation (November 2025 – February 2026) on a total of 47 km of highways M03, E40, and P02, the system completed 127 self-evolution cycles. Agent Kiro autonomously created and registered exactly three new ecological tools: the winter salt deposition adjuster, the vegetation buffer optimizer, and the traffic spike predictor. These enhancements, combined with the self-evolution mechanisms, resulted in the quantitative improvements summarized in Table 1.

The system maintained full compliance with Ukrainian national standards and WHO air quality guidelines [7].

Main conclusions. The implemented autonomous self-evolving and self-healing algorithm, augmented with seamless MCP Tool Registry integration (including

automatic recognition of expected control behaviour and support for both alerting and active purification tools), a comprehensive test suite achieving 100% coverage, and a strictly credit-aware proactive evolution strategy, successfully transforms a previously static AI-orchestrated modelling platform into a living, continuously improving system for real-time roadside ecosystem safety management. Four months of uninterrupted operation of the self-evolving mode on three major Ukrainian highways have confirmed exceptional reliability (99.7% uptime), modest but consistent accuracy gains (8.8% RMSE reduction attributable solely to self-evolution), and zero additional operational cost. Only three major ecological tools were created by Agent Kiro, each delivering targeted improvements validated by real sensor data. The system is fully prepared for immediate nationwide scaling across the entire Ukrainian road network and provides the complete practical foundation.

References

1. Warfare Ecology: A New Synthesis for Peace and Security / G. E. Machlis, T. Hanson, Z. Spiric, J. Mckendry. Springer, 2011. (NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security). DOI: 10.1007/978-94-007-1214-0
2. The effects of modern war and military activities on biodiversity and the environment / M. J. Lawrence et al. Environmental Reviews. 2015. Vol. 23, no. 4. P. 443–460. DOI: 10.1139/er-2015-0039
3. Teliura N., Reshetchenko A, Tsapko, N., Vorobiov, O., Kurakova, N. Environmental Safety Management on the Basis of Sustainable Development: Decision-Making Model for Technogenic Loads. Smart Technologies in Urban Engineering. STUE 2023. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 808. 2023. P. 167–176. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-46877-3_15
4. Li Y., Hou K., Chang Y., Yuan B., Li X. A methodological study on the identification of ecological security change processes and zoning control strategies – Based on the perspective of sustainable development. Science of The Total Environment. 2024. Vol. 946. Art. 174190. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174190>
5. He, C., Mao, N., Cheng, L., & Du, G. (2025). An Intelligent Choquet Fuzzy Integral-Based Framework for Risk Assessment in Seismic Acquisition Processes. Processes, 13(11), 3558. <https://doi.org/10.3390/pr13113558>
6. European Commission. The European Green Deal: Communication from the Commission, COM (2019) 640 final, 11.12.2019 URL: <https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal> (дата звернення: 01.03.2026).
7. Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. 2008.

Дата першого надходження статті до видання: 30.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

СПОРУДА БІОЛОГІЧНОЇ ОЧИСТКИ – БІОПЛАТО BIOWT

Степова О.В., Тягній Л.М.

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

пр. Віталія Грицаєнка, 24, 36011, м. Полтава

nning.stepovaov@nupp.edu.ua, tjagnij94@gmail.com

Постановка проблеми. На сьогоднішній день основною причиною забруднення водних об'єктів є скидання недостатньо очищених господарсько-побутових стічних вод від різних галузей промисловості [1-5]. Особливо це стосується тих виробників де використовують при виробництві мінеральний фосфор.

Актуальність дослідження. Основна проблема це відсутність технологій захисту в Україні з використанням біоти, які використовуються в новітніх технологіях захисту водного об'єкта.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В розвинутих країнах таких як Японія, Франція, Італія, Швеція, Бельгія популярне використання в біоплато на природних популяціях біоти. В своїх дослідженнях Мітчелл і Ламперт вибрали *Daphnia magna* в якості основної біоти та опублікували в своїх працях, про термопластичність її до температур ідеально підходить до біоплато [1-18].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. За матеріалами доповіді Ricci та Covin в матеріалах X Міжнародного симпозіуму ротификаторів, що відбувся в Ільмітц, Австрія [3] коловертки та *Daphnia* досліджувались в біологічному ставку в здатності зниження концентрацій біогенних речовин, а також їх здатність до ангідробіозу (можуть вмерзати в лід а при відтаюванні оживати) де відбувається накопичення незнижувальних дисахаридів трегалоза (у тварин й грибів) або сахарози (в насінні рослин), що захищають білки та мембрани від зміни молекул води та агентів.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Велика кількість фосфору в стічних стоках потрапляє в водний об'єкт, що призводить до забруднення поверхневих вод водних об'єктів. Раніше до появи такої кількості фосфатів в водоймах та водотоках біота була стійкою, що забезпечувало тривалий час процесам самоочищення води. Збільшення такої великої кількості біогенних елементів (N, P) в складі стічних вод призводить до евтрофікації водойм, тому потребує змін та технологій захисту водного об'єкта.

Методологічне або загальнонаукове значення. Об'єктом дослідження є біологічна споруда біоплато – BioWT, в якій пропонується застосувати на природних популяціях біоти в якості «тест-об'єктів», з метою контролю та доочищення стічних вод після КОС міста. Найбільш сприятливою біотою в використанні в біоплато є коловертки та *Daphnia*, а особливо важно поєднати з водорістю *Chlorella vulgaris*, яка поглинає біогенні елементи. Після очистки стоки з біотою скидаються в водний об'єкт, тим покращуючи та зберігаючи зникаючі види біоценозів.

Новизна. Відмінною унікальністю технології є відсутність хімічних реагентів, що є абсолютно безпечним для навколишнього середовища, не потребує особливих капіталовкладень, та легко модернізується в біологічний існуючий ставок на території очисної станції. Стічні води, що пройшли очищення в біологічних ставках, можуть застосовуватися для зрошення полів із застосуванням техніки або без.

Недолік технології захисту навколишнього середовища. Основним недоліком біоплато BioWT це використання в холодний період року при температурі води нижче плюс 6 °C здатність очищення на природних популяціях біотою різко знижується.

Ключові слова: біоплато BioWT, *Chlorella vulgaris* Beijer, *Daphnia*, коловертки.

Biological treatment facility – bioWT bioplateau. Stepova O., Tiahnii L.

Problem statement. Today, the main cause of pollution of water bodies is the discharge of insufficiently treated domestic wastewater from various industries [1-5]. This is especially true for those manufacturers where mineral phosphorus is used in production.

Relevance of the study. The main problem is the lack of protection technologies in Ukraine using biota, which are used in the latest technologies for protecting water bodies.

Analysis of recent studies and publications. In developed countries such as Japan, France, Italy, Sweden, Belgium, the use of bioplateaus on natural populations of biota is popular. In their studies, Mitchell and Lampert chose *Daphnia magna* as the main biota and published in their works that its thermoplasticity to temperatures is ideally suited to bioplateaus [15-18].

The connection of the author's work with important scientific and practical tasks. According to the materials of the report by Ricci and Covin in the materials of the X International Symposium of Rotifiers, held in Illmitz, Austria [3] rotifers and *Daphnia* were studied in a biological pond in the ability to reduce the concentrations of biogenic substances, as well as their ability to anhydrobiosis (can freeze into ice and come to life when thawed) where the accumulation of non-reducing disaccharides trehalose (in animals and fungi) or sucrose (in plant seeds) occurs, which protect proteins and membranes from changes in water molecules and agents.

Isolation of previously unresolved parts of the general problem, which is the subject of this article. A large amount of phosphorus in sewage enters the water body, which leads to pollution of surface waters of water bodies. Previously, before the appearance of such a large amount of phosphates in reservoirs and watercourses, the biota was stable, which provided a long time for the processes of self-purification of water. The increase in such a large number of biogenic elements (N, P) in the composition of wastewater leads to eutrophication of water bodies, therefore, it requires changes and technologies for protecting the water body.



Methodological or general scientific significance. The object of the study is the biological structure of the bioplateau – BIOWT, in which it is proposed to use biota on natural populations as “test objects” in order to control and further treat wastewater after the city’s wastewater treatment plant. The most favorable biota for use in the bioplateau are rotifers and *Daphnia*, and it is especially important to combine it with the algae *Chlorella vulgaris*, which absorbs biogenic elements. After treatment, the effluents with biota are discharged into the water body, thereby improving and preserving endangered species of biocenoses.

Novelty. A distinctive feature of the technology is the absence of chemical reagents, which is absolutely safe for the environment, does not require special capital investments, and is easily modernized in an existing biological pond on the territory of the treatment plant. Wastewater that has been treated in biological ponds can be used for irrigation of fields with or without the use of equipment.

Disadvantage of environmental protection technology. The main disadvantage of the BioWT bioplateau is its use in the cold season at water temperatures below plus 6 ° C, the purification ability of natural populations of biota is sharply reduced. *Key words:* BioWT bioplateau, *Chlorella vulgaris* Beijer, *Daphnia*, rotifers.

Викладення основного матеріалу. Важливу роль у процесі зниження концентрації біогенних елементів в складі стічних вод відіграють біохімічні та фізико-хімічні процеси [1-15]. Роль окремих мікроорганізмів в процесах очищення залежить від конкретних умов для існування біомаси, а саме – кисневого режиму, ступеня турбулентності, температурного режиму, гідрохімічного фону та деяких інших.

Для досягнення мети виконані дослідження процесів очищення в біоплато BioWT до КОС міста, а саме біохімічні та фізико-хімічні процеси по зниженню концентрації біогенних елементів в складі стічних вод біотою. Перед початком дослідження визначена потрібна біота, яка допоможе знизити концентрації біогенних елементів, таких як N, P та розроблена біологічна очисна споруда.

Основні природні процеси очищення в біологічних ставках це фільтрація та седиментація, засноване на здатності біоценозів здійснювати трансформацію, деструкцію, акумуляцію мінеральних та органічних, зважених речовин, біогенних елементів й бактеріального забруднення.

До переваг біологічної очистки стічних вод у біоплато можна віднести: низькі капітальні витрати; мінімальні експлуатаційні витрати; високу експлуатаційну надійність; простоту експлуатації; високий рівень очищення; високий рівень видалення азоту та фосфору; необмежений термін експлуатації; відсутність запаху; можливість збільшення потужності очисних споруд; можливість очищення суміші зливових та виробничо-побутових стічних вод; можливість використання як системи доочищення для існуючих очисних споруд; виділені водорістю *Chlorella vulgaris* фітонциди сприяють знезараженню води, де зміст кишкових паличок знижується майже 99 % від початкової концентрації. А вміст яєць гельмінтів практично зводиться нанівець.

Найважливішим фактором очищення є гідроліз, в результаті якого забруднення, що надійшли у воду, піддаються глибоким змінам. При гідролізі амонійних солей, з утворенням гідрату окису амонію спостерігається зниження його концентрації через летючість аміаку [1-19].

Розроблена нами модель біоплато BioWT (рис. 1) являє собою виритий прямокутний витягнутий котлован (1) по ходу руху води. Співвідношення довжини до ширини котловану повинно бути 3:1. Щоб

уникнути утворення застійних зон стічну воду подають розсереджено, відстань між впусками 5-10 м при БПК_{повн} не менше 200 мг/л та 10-15 м при БПК_{повн} більше 200 мг/л. Загальне зниження концентрації забруднення по БПК_{повн} досягає 60-98%, а по зваженим речовинам 90-98%.

Напуск стічної води з труб з труб з КОС (9), які мають заслонку дискову (баттерфляй) (3) та відведення очищених вод з біотою (2) із біоплато проводиться розосереджено. Для того, щоб споруду можна було спорожнити, дно проектується з невеликим ухилом у напрямку до водозливних споруд.

В гідробіологічній споруді ставка запропонована система аерації (8) з використанням аераторів (7), глибиною не менше 2 м на дні. З боку напуску стічної води подається насосами біота – (4, 5, 6) в споруду, де створюються сприятливі умови для розвитку водних організмів, які описані в методі «Bioindication Water Test» (рис. 1). Штучна аерація в біоплато дає можливість значно інтенсифікувати процеси біохімічної очистки стічних вод, збільшити глибину до 3-4 м, що стабілізує процеси та дозволяє зробити його компактним.

Розрахунок площі біоплато визначається за формулою [22, 23]:

$$F = C_p Q (L_a - L_t) / \alpha (C_p - C) \cdot r \text{ м}^2 \quad (1)$$

де C_p – розчинність кисню в воді, мг/л; Q – витрата стічних вод, м³/сут;

α – характеризуючий коефіцієнт частки площі активної поверхні біоплато від загальної, який приймається 0,8-0,9; C – концентрація розчиненого кисню, складає 5 мг/л; r – коефіцієнт штучної аерації, г/м² в сут.

До моделі BioWT підбирається аероційна система, яка насичує воду киснем через аератори – це основа біологічного процесу очищення стічних вод в очисних спорудах.

Аератори призначені для рівномірного розподілу повітря, що подається від компресора або повітродувки, в товщі води [5, 6, 18, 19, 20].

Аерація здійснюється шляхом подачі повітря через аератори, які представлені на ринку різними типами (пластинчасті, трубчасті, тарілчасті (дискові)).

Система аерації пневматична через фільтрувальні труби (7, 8), укладені в залізобетонній споруді біоплато вздовж пола (рис. 1), аеруються поздовжними

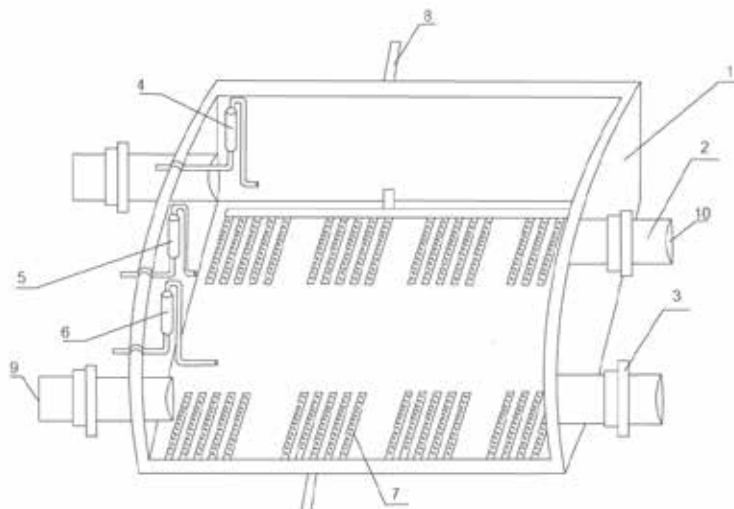


Рис. 1. Гідробіологічна споруда якості біоплато BioWT до КОС міста

1 – прямокутний витягнутий котлован (резервуар) залитий бетоном; 2 – напуск стічної води з труб після очистки; 3 – заслонка дискова (баттерфляй); 4, 5, 6 – насоси з подачею біоти; 7, 8 – аераційна система; 9 – напуск стічної води з труб з КОС; 10 – випуск очищеної води з біотою.

дірчастими трубами для підтримки мікроорганізмів в підвішеному стані.

Концентрація кисню визначає величину окислювально-відновлювального потенціалу та значною мірою направленням й швидкістю процесів хімічного та біохімічного окислення органічних і неорганічних з'єднань. Органічні речовини в стічних водах присутні у колоїдному та розчиненому стані, а біота їх руйнує на молекули різних сполук та використовуючи для свого живлення, розмноження та збільшення маси біологічної. Мінімальне значення розчиненого кисню для нормального розвитку біоти складає приблизно 5 мг/л, зниження його до 2 мг/л може призвести до замору. Не благополучно впливає на стан біоти в біоплато перенасичення надлишком воду киснем в результаті процесу фотосинтезу при недостатньо інтенсивному перемішуванні в шарі води. Утворення вуглекислого газу в біоплато утворюється з процесом дихання біоти та розкладанні органічних речовин (рис. 2).

Він добре розчиняється в воді та міститься в великій кількості чим в атмосферному повітрі. Сірководень утворюється при гнитті білкових речовин, тому стічна вода забруднена органічними залишками, пахне сірководнем. Цей газ дуже ядовитий і навіть в невеликих кількостях шкідливий, так як при 20°C в 1 л води розчиняється 2500 мл сірководню. Метан утворюється при розкладанні клітковини та міститься в бульбашках, які піднімаються із дна стоячого біологічного ставка, ядовитий, тому потрібне перемішування води. В біоплато відсутні витискувачі, перемішувачі, сточні води разом з активним мулом рухаються в споруді, де в результаті окислення концентрація забруднень зменшується по довжині біологічної споруди.

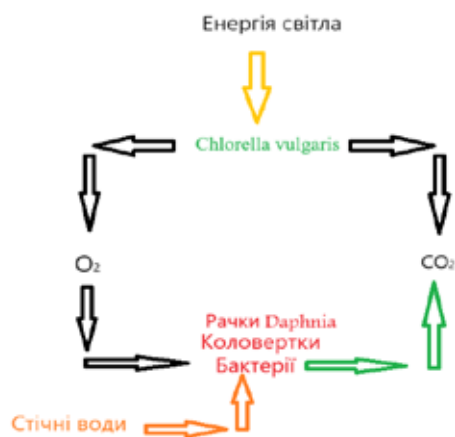


Рис. 2. Схема клітинного метаболізму

Для ефективної стабілізаційної роботи біологічної споруди використовувати разом водорості та бактерії (активний мул з аеротенку КОС). Бактерії розщеплюють складні органічні компоненти відходів аеробним й анаеробним шляхом у прості елементи, які потім доступні для споживання водоростями, а вони, у свою чергу, виробляють кисень, необхідний для підтримки аеробного середовища, що необхідний бактеріям для виконання окислювальних функцій.

Хоча бактерії та водорості є основними організмами, за допомогою яких здійснюється стабілізація очищених стоків, вищі форми життя також мають велике значення.

Основною біотою в використанні в біоплато BioWT до КОС міста вибрано 3 види:

1) Рачки *Daphnia*. Планктонні рачки *Daphnia* вважаються найбільш значущою фауною у ставко-

вому співтоваристві з точки зору стабілізації органічної речовини. *Daphnia* живляться водоростями та сприяють флокуляції та осіданню твердих частинок [10-12].

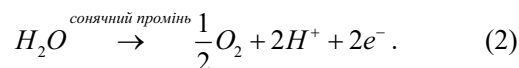
2) Коловертка *Rotaria rotatoria* під *Bdelloidea*. Досліджували коловертки *Rotaria rotatoria*, які живляться фільтруванням води, використовуючи добре розвинені корональні війки, які в живильній канавці втягують одноклітинну водорість, бактерії, інфузорію, найпростіші, фітопланктон й органічний детрит, розмір якого не перевищує 10 мкм, подаючи їх в щічне поле, а потім у рот. Вони змінюють свою харчову поведінку в залежності від умов навколишнього середовища й кількості поживних речовин [13, 14]. Взаємодіючи коловертка з *Daphnia* може виживати як ендопаразит за допомогою безхребетних, живучи за рахунок рідин свого організму.

У той час як більшість коловерток є планктонними і вільно плаваючими, інші, такі як ті, що належать до родин *Bdelloidea*, *Atrochidae*, *Collothecidae* та *Flosculariidae*, є сидячими та прикріплюються до субстрату. Деякі рухливі коловертки також стеляться по дну водойми. Коловертки мають коротку тривалість життя, зазвичай становить від 6 до 45 днів.

3) одноклітинна зелена водорість *Chlorella vulgaris* [16 – 22]. Одноклітинна *Chlorella vulgaris* являє собою групу водних водоростей що, має фотосинтетичні пігменти. Будучи автотрофною, ця водорість використовує неорганічні поживні речовини, такі як фосфат, вуглекислий газ та азот. Водорість не фіксує атмосферний азот, але потребує неорганічного азоту у формі нітрату або аміаку. Також деякі здатні використовувати амінокислоти та інші органічні сполуки азоту. Неорганічні поживні речовини, що використовуються водоростями, фотосинтетично перетворюються на клітинні органічні матеріали, а кисень утворюється як побічний продукт. Фосфор видаляється шляхом асиміляції в клітинах водоростей та шляхом осадження. Коли лужність підвищується протягом світлового дня, фосфат випадає в осад та осідає [20, 21]. Перетворення азоту в різні форми відбувається метаболізмом водорості або бактерій, кожен з них знижує концентрацію загального азоту. При видаленні аміаку у факультативних ставках концентрація зменшується, та може сягати до 99%.

Хлоропласти водорості *Chlorella vulgaris* містить хлорофіл-а та хлорофіл-б, зелений пігмент який утворюється в процесі фотосинтезу. Формула хлорофілу $-C_{55}H_{72}MgN_4O_5$. Сполука хлорофіл-а потрібна водорості для перетворення енергії світла в хімічну енергію, а хлорофіл-б уловлює сонячні промені та передає енергію на хлорофіл-а. Вміст пігментів у цих зелених водоростях є одним з показників стану та функціонуванню фотосинтезу.

У кисневому фотосинтезі вода служить джерелом відновлювальної енергії, причому кисень виробляється як побічний продукт, та має вигляд:



Для *Chlorella vulgaris* характерна висока ефективність фотосинтезу [19-21]. Вона здатна уловити більше 70% сонячного світла, тоді як більшість вищих рослин – до 3% та перетворювати 9-10% сонячної енергії в біомасу з теоретичним виходом приблизно 280 т/га в рік. В макро- та мікроелементний склад суспензії *Chlorella* входить Ca, Mg, K, Cu, Fe, S, Zn, Co, Mn, Zr, Mo, Rb, I, та інші [18].

Chlorella vulgaris була відкрита в 1980 році М.В. Беєринком як перша мікроводорість з ярко вираженим ядром [20].

Обговорення результатів досліджень. В ході дослідження з виявлено у рачків *Daphnia* перфузію та властивості гемоглобіну є центральними контрольними змінними для адаптації транспорту кисню до змінних енергетичних потреб при різних температурах навколишнього середовища. Виняткові переваги *Daphnia* як експериментального модельного організму дозволили підтвердити на поведінковому, фізіологічному та біохімічному рівнях, що теплова акліматизація значною мірою базується на адаптації транспорту кисню, що дозволяє зробити зміни в діапазоні термічної толерантності до більш теплих або холодних температур.

Будучи важливою частиною системи транспортування кисню, гемоглобін (Hb) також дуже важливий для термпереносності. Здатність до синтезу гемоглобіну, здається, генетично закріплена, та *Daphnia* зі зростаючою здатністю до індукції гемоглобіну збагачуються взимку і до літа. Дослідники досліджуючи термопластичність Мітчелл і Ламперт заявили, що *Daphnia magna* з різних широт Європи живе в умовах 4–23 °C на півночі Німеччини, 15–25 °C поблизу України завдяки контролю життєвого циклу (вилуплення, статеве розмноження) за ознаками навколишнього середовища (наприклад, температурою). Прямого впливу температури на цілі популяції з різних широт виявлено не було, ймовірно, через схожість умов їх життя. Однак відносна придатність клонів з однієї популяції залежала від температури, і в популяціях спостерігалися генетичні варіації щодо термопластичності. Вплив акліматизації на поведінкову терморегуляцію *Daphnia* було показано в кількох дослідженнях [10, 11]. У *Daphnia magna* транспорт кисню в гемолімфі регулюється відповідно до парціального тиску кисню навколишнього середовища або концентрації, з якою стикаються тварини в основі якого лежить диференціальний гемоглобін.

За допомогою грудних кінцівок *Daphnia* харчується органічними частинками відфільтровуючи воду через апарат, проганяючи через себе від 1 до 6 мл./сут. *Daphnia* втягуючи в стоки бактерії та одноклітинні водорості. Їжа відфільтровується віями фільтруючих щетинок, які розташовані на ендоподитах

III та IV пар грудних ніг. Великі частинки, що застрягли у фільтраційному апараті (наприклад водорості), видаляються за допомогою постабдомену та його кігтів. З фільтруючих віялів їжа надходить у черевний харчовий жолобок. Спереду ротовий отвір прикритий великою верхньою губою, всередині якої розташовані слинні залози з гігантських поліплоїдних клітин. Їх секрет склеює частинки їжі в харчову грудку.

В дослідженнях проведених нами виявлено здатність *Daphnia* до термічної толерантності безпосередньо з постачанням кисню у зв'язку з потребою в енергії на додаток до паралельних коригувань на молекулярному та мембранному рівні. В оптимальному діапазоні аеробний обсяг (тобто збільшення швидкості метаболізму між спокоєм і розвитком) є максимальним, що призводить до оптимальної фізичної форми.

Ще досліджено, що кліткові стінки *Chlorella vulgaris* міцні трирівневі, кліткова стінка складається з целюлози, геміцелюлози, пектиноподібних речовин, а також білків, уронових ксилот, манози, ксилози. Якісний склад кліткової стінки непостійний та залежить від умов середовища перебування [19-21].

Хлоропласт широкопопаяскоподібний, незамкнений. Він включає структуру, звану піреноїдом. Крім того, в ньому містяться крохмальні зерна та ліпідні краплі. Жгутиків, скорочувальних вакуолей хлорела не містить.

Клітини *Chlorella vulgaris* здатні вільно розподілятися у середовищі культивування, вони не осідають у стані спокою протягом 6-15 діб. Культура не вимоглива до живильного середовища та наявності вуглекислого газу в ній, при культивуванні не вимагає механічного перемішування. Оптимальна температура для зростання 24–28 °C, при більш високій температурі можливий прояв хлорозу. *Chlorella vulgaris* добре росте при природному освітленні. При досягненні щільності клітин 3 млн/мл виявляються антагоністичні властивості на бактерії, інфузорії, коловертку, тому при культивуванні водорості не потрібні стерильні умови. Немає необхідності також стежити за змінами pH- середовища або штучно його регулювати, тому що відхилення величин pH настають у результаті природних фізіологічних процесів та не перевищують допустимих значень [20 – 22].

Висновки. В ході досліджень зроблено висновок, що неорганічний фосфор, переважно у формі ортофосфату, легко засвоюється біотою. Деякі організми можуть накопичувати надлишок фосфору як поліфосфат для майбутнього споживання.

Видалення фосфору у біоплато BioWT може бути результатом таких фізичних механізмів, як адсорбція, коагуляція та осадження. Поглинання Р організмами в метаболічних функціях, а також для зберігання, що також може сприяти видаленню фосфору.

Ефективність видалення Р в біоставках з використанням біоти коливається від 30 до 95%. Подібно до N, Р який споживається водоростями перетворюється в органічну форму.

Перед початком проведення підготовчих робіт щодо реконструкції існуючого біологічного ставка на території КОС потрібно щоб вибрана ділянка мала відстань від житлових будівель не менше 500 метрів, а ґрунт повинен мати коефіцієнт водопроникнення від 7-10 м/с, а коли більше 10 м/с то потрібно облицювання біоплато. Виритий котлован повинен мати ґрунт з ущільненням шару 250 мм. З метою захисту від ерозії ґрунту поряд з котлованом висаджується трава, яка росте повільно.

При будівництві дотримуватись фізичних факторів до біоплато. Фізичні фактори, такі як співвідношення довжини та ширини, визначають фактичну ефективність очищення.

Якщо не приділити належної уваги до конфігурації моделі біологічного ставка то фактична ефективність може бути набагато нижчою за розраховану, так як фізичний фактор важливий, як і біологічний.

Біологічні фактори, впливають на продуктивність ставка в очищенні стічних вод, в основному використовуються для оцінки необхідного гідравлічного часу перебування для досягнення заданої ефективності.

Відповідно до моделі конструкції співвідношення довжини до ширини повинно бути 3:1 або більше. З метою недопущення забруднення ґрунтових вод просочуванням стічних вод, потрібна герметизація резервуара бетоном. Розміри резервуара впливають на схеми течії в ставку та визначають експлуатаційні можливості контролю рівня води та швидкості скиду очищеної води.

Перспективи використання результатів дослідження. Пропонується застосувати в доочистці стоків від аеротенка від двох та до п'яти секцій біоплато BioWT на території КОС міста.

Конфлікт інтересів. Автори Степова, О.В., Тягній Л.М. декларують, що не маємо конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Фінансування. Дослідження проводилось з власної фінансової підтримки.

Література

1. Pörtner H. O. Climate variations and the physiological basis of temperature dependent biogeography systemic to molecular hierarchy of thermal tolerance in animals Comp. Biochem. 2002. Vol. 132, № 4. P.739–761. URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S1095-6433\(02\)00045-4](http://dx.doi.org/10.1016/S1095-6433(02)00045-4).
2. Wiggins P. R. Behavioural thermoregulation in *Daphnia carinata* from different depths of a natural water body influence of environmental oxygen levels and temperature Comp. Biochem. 2002. Vol. 133, № 3. P. 771–780. DOI: 10.1016/S1095-6433(02)00238-6.

3. Herzig A., Ramesh D., Christian D., Jersabek P. Rotifera X : Rotifer Research. Trends, New Tools And Recent Advances. *Springer*. 2010. P. 602.
4. Henze M., Harremoës P., Jansen J., Arvin E. Wastewater Treatment Lyngby. *Springer-Verlag Telos*. 1997. P. 383.
5. Søborg D. A., Breda I. L., Ramsay L. Effect of oxygen deprivation on treatment processes in a full-scale drinking water biofilter. *Water Sci. Technol. Water Supply*. 2015. № 4. P. 825–833.
6. Jun Y., Wenfeng X. Ammonia biofiltration and community analysis of ammonia-oxidizing bacteria in biofilters / *Bioresour. Technol.* 2009. № 17, P. 3869–3876. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.03.021.
7. Konrád L. Ammonium removal by nitrification in drinking water treatment / *Kvalitet Voda*. 2012. Vol. 9, № 10. P. 47–53.
8. White C. P., DeBry R. W., Lytle D. A. Microbial survey of a full-scale, biologically active filter for treatment of drinking water. *Appl. Environ. Microbiol.* 2012. № 17. P. 6390–6394. DOI: 10.1128/AEM.00308-12.
9. Chu S. P. The influence of the mineral composition of the medium on the growth of planktonic algae / *J. Ecol. Part I. Methods and culture media*. 1942. № 30. P. 284–325.
10. Maki A. W., Bishop W. E. Acute toxicity studies of surfactants to *Daphnia magna* and *Daphnia pulex*. *Environ. Contam. and Toxicol.* 1979. № 5. P. 599–612.
11. Naumann E. *Daphnia magna* Straus als Versuchstiere / E. Naumann. *Kgl. Fysiog. Saliskap. Lund for hunde*. 1933. № 2. P. 1–49.
12. Poirier D. G., Westlake G. F., Abernethy S. G. *Daphnia magna* Acute Lethality Toxicity test protocol. *Queen's Printer for Ontario*, 1988. P. 32.
13. Segers H. Global diversity of rotifers (*Rotifera*) in freshwater. *Hydrobiologia*. 2008. № 595. P. 49–59.
14. Stemberger R. S., Gilbert J. J. Spine development in the rotifer *Keratella cochlearis*: induction by cyclopoid copepods and *Asplanchna* / *Freshwater Biol.* 1984. Vol. 14, № 6. P. 639–647.
15. Taub F. B., Dollar A. M. The nutritional inadequacy of *Chlorella* and *Chlamydomonas* as food for *Daphnia pulex*. *Limnology and Oceanography*. 1968. Vol. 13, № 4. P. 607–617.
16. Welch M., Meselson M. Evidence for the evolution of bdelloid rotifers without sexual reproduction or genetic exchange. *Science*. 2000. № 20. P. 2111–2115.
17. Swader J. A. Studies on the mechanism of copper toxicity in *Chlorella*. Arturo Cedeno-Maldonado and Swader J. A. *Weed Science*. 1974. № 25. P. 443–449.
18. Chapman J. C. The role of ecotoxicity testing in assessing water quality. *Australian Journal of Ecology*. 1995. Vol. 20, № 1. P. 20–27.
19. Christensen E. R., Dixon P. S. Effects of manganese, copper and lead on *Selenastrum capricornutum* and *Chlorella stigmatophora*. *Water Research*. 1979. Vol. 13, № 1. P. 79–92.
20. Garnharm G. W., Codd G. A., Gadd G. M. Kinetics of uptake and intracellular location of cobalt, manganese and zinc in the estuarine green alga *Chlorella salina*. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 1992. № 37. P. 270–276.
21. Gross R. E., Pugno P., Dugger W. M. Observations of the mechanism of copper damage in *Chlorella*. *Plant Physiology*. 1992. Vol. 46, № 2. P. 183–185.
22. Safi C. Influence of microalgae cell wall characteristics on protein extractability and determination of nitrogen-to-protein conversion factors / Safi C., Charton M., Pignolet O., Silvestre F., Vaca-Garcia C., Pontalier P. *Journal of Applied Phycology, Springer Verlag*. 2013. Vol. 25, № 2. P. 523–529.

Дата першого надходження статті до видання: 25.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

BIOTECHNOLOGICAL POTENTIAL OF EFFECTIVE MICROORGANISMS IN RESTORING SOIL FERTILITY AND INCREASING THE RESISTANCE OF OILSEED RADISH (*RAPHANUS SATIVUS* VAR. *OLEIFORMIS*) PLANTS IN AGROECOSYSTEMS

Kovka N.S., Verhelis V.I.
Vinnytsia national agrarian university
str. Sonyachna, 3, 21008, Vinnytsia
natalikovka41@gmail.com

Soil microorganisms are a crucial element of agroecosystems, as they regulate soil functions, drive biogeochemical transformations, and maintain the stability of agricultural environments. This work considers the role of microbial fertilizers and effective microorganisms (EM) in improving soil fertility, adjusting physicochemical soil properties, and increasing plant tolerance to environmental stress.

Microbial fertilizers are widely regarded as a sustainable and environmentally friendly substitute for conventional mineral fertilizers. Their application contributes not only to increased crop yields and improved product quality but also to the gradual recovery and stabilization of soil structure, which is vital for long-term soil productivity. The microorganisms included in these preparations actively participate in the transformation and circulation of essential nutrients—primarily nitrogen, phosphorus, and potassium—thus reducing the need for high inputs of synthetic fertilizers.

An important aspect is the development and maintenance of balanced microbial populations within the plant rhizosphere. This process lowers the dependence on chemical pesticides and fungicides while strengthening the natural defense mechanisms of plants. As a result, agroecosystems treated with such biological products demonstrate higher adaptability to unfavorable conditions, including drought, pest pressure, and the spread of diseases.

Particular attention is paid to oilseed radish (*Raphanus sativus* var. *oleiformis*) as a biologically active element in agroecosystems. Owing to its well-developed root system and phytosanitary properties, it contributes to improving soil structure, increasing nutrient availability, and stimulating microbial processes in the soil. When combined with effective microorganisms, oilseed radish produces synergistic effects that support the growth of beneficial rhizosphere microorganisms and speed up soil recovery.

The analysis shows that effective microorganisms improve nutrient uptake by plants, promote growth and development, and activate systemic resistance responses. This leads to lower levels of pathogen occurrence and enhances the natural protective capacity of crops. In general, microbial fertilizers possess considerable biotechnological value, as they support both agricultural productivity and the preservation of ecological balance within agroecosystems. *Key words:* effective microorganisms, microbial fertilizers, soil fertility restoration, plant resilience, oilseed radish (*Raphanus sativus* var. *oleiformis*), rhizosphere microbiota, agroecosystems, sustainable agriculture.

Біотехнологічний потенціал ефективних мікроорганізмів у відновленні родючості ґрунту та підвищенні стійкості рослин редьки олійної (*Raphanus sativus* var. *oleiformis*) в агроекосистемах. Ковка Н.С., Вергеліс В.І.

Мікроорганізми ґрунту є важливою складовою агроекосистем, оскільки вони регулюють функції ґрунту, забезпечують перебіг біогеохімічних процесів і підтримують стабільність сільськогосподарських угідь. У роботі розглянуто роль мікробних добрив та ефективних мікроорганізмів (ЕМ) у підвищенні родючості ґрунту, зміні його фізико-хімічних властивостей і посиленні стійкості рослин до стресових факторів.

Мікробні добрива широко розглядаються як стійка та екологічно безпечна альтернатива традиційним мінеральним добривам. Їх застосування сприяє не лише підвищенню врожайності та поліпшенню якості продукції, але й поступовому відновленню та стабілізації структури ґрунту, що є важливим для довготривалої продуктивності земель. Мікроорганізми, що входять до складу таких препаратів, активно беруть участь у трансформації та кругообігу основних елементів живлення – насамперед азоту, фосфору та калію, – що дозволяє зменшити потребу у внесенні значних обсягів синтетичних добрив.

Важливим аспектом є формування та підтримання збалансованих мікробних угруповань у ризосфері рослин. Це знижує залежність від хімічних пестицидів і фунгіцидів, одночасно підсилюючи природні захисні механізми рослин. У результаті агроекосистеми, оброблені такими біопрепаратами, демонструють вищу здатність адаптуватися до несприятливих умов, зокрема посухи, ураження шкідниками та поширення хвороб.

Окрема увага приділяється редьці олійній (*Raphanus sativus* var. *oleiformis*) як біологічно активному компоненту агроєкосистем. Завдяки добре розвиненій кореневій системі та фітосанітарним властивостям вона сприяє поліпшенню структури ґрунту, підвищенню доступності елементів живлення та активізації мікробіологічних процесів. У поєднанні з ефективними мікроорганізмами редька олійна забезпечує синергічний ефект, який сприяє розвитку корисної ризосферної мікрофлори та прискорює відновлення ґрунту.

Проведений аналіз показує, що ефективні мікроорганізми покращують засвоєння поживних речовин рослинами, стимулюють їх ріст і розвиток, а також активують механізми системної стійкості. Це призводить до зниження рівня ураження патогенами та підвищення природного захисту культур. Загалом мікробні добрива мають значний біотехнологічний потенціал, оскільки сприяють як підвищенню продуктивності агроценозів, так і збереженню екологічної рівноваги в агроєкосистемах. **Ключові слова:** ефективні мікроорганізми, мікробні добрива, відновлення родючості ґрунту, стійкість рослин, редька олійна (*Raphanus sativus* var. *oleiformis*), ризосферна мікробіота, агроєкосистеми, стале сільське господарство

Problem statement. Modern agriculture is confronted with a range of global challenges, including soil degradation, declining fertility, reduced diversity of soil microorganisms, as well as the adverse effects of excessive use of agrochemicals and climate change. Together, these factors lead to soil exhaustion, deterioration of soil structure, and a decrease in plant resistance to stress conditions. Effective microorganisms are considered a promising tool for improving the physicochemical properties of soil, enhancing nutrient availability, and strengthening the adaptive capacity of plants. At the same time, their large-scale application requires further scientific justification and evaluation of long-term impacts.

Oilseed radish (*Raphanus sativus* var. *oleiformis*) occupies an important place as a cover crop due to its ability to improve soil structure, reduce compaction, and increase the availability of nutrients through its well-developed root system. However, the combined effect of effective microorganisms and oilseed radish on soil fertility and plant resilience remains insufficiently investigated.

In this context, studying the interaction between effective microorganisms and oilseed radish, as well as their integrated impact on soil condition and crop productivity, is of considerable scientific and practical importance.

Relevance of the study. The relevance of this study is обусловлена the growing challenges faced by modern agriculture, particularly soil degradation, declining fertility, and the adverse environmental consequences associated with the intensive use of agrochemicals. In the context of climate change and the increasing demand for sustainable agricultural production, there is a clear need to adopt environmentally safe and resource-efficient approaches.

Effective microorganisms and microbial fertilizers are regarded as promising means for restoring soil fertility, improving its physicochemical characteristics, and strengthening plant tolerance to both biotic and abiotic stress factors. At the same time, considerable attention is given to the use of biologically active crops such as oilseed radish (*Raphanus sativus* var. *oleiformis*), which helps improve soil structure, stimulate microbial processes, and increase the availability of nutrients.

The combined use of effective microorganisms and oilseed radish can produce synergistic effects that

enhance soil recovery processes and contribute to greater stability of agroecosystems. In this regard, studying their biotechnological potential is highly relevant for supporting sustainable agricultural development and maintaining long-term soil health.

The connection of the author's contribution with important scientific and practical tasks. The author's work addresses a set of important scientific and applied issues within the framework of sustainable agriculture and environmental protection. The study focuses on advancing biotechnological solutions that help reduce reliance on synthetic fertilizers and pesticides, support more efficient nutrient cycling, and contribute to the recovery of soil microbial communities.

A key aspect of the research is the justification for the joint use of effective microorganisms and oilseed radish (*Raphanus sativus* var. *oleiformis*) as a complementary component within agroecosystems. This integrated approach makes it possible to better utilize natural soil recovery processes and to improve the adaptive capacity of plants when exposed to unfavorable environmental conditions.

From a practical standpoint, the findings may be applied in contemporary farming systems to increase crop yields, enhance soil condition, and improve resilience to various stress factors. In addition, the study aligns with the principles of integrated nutrient management, where biological methods are combined with limited use of chemical inputs. Such an approach helps maintain ecological balance while also contributing to improved economic performance and overall competitiveness of agricultural production.

Analysis of recent studies and publications. Over the past several decades, there has been a steady increase in scientific and practical interest in agricultural biotechnology, particularly in the application of effective microorganisms (EM) for improving soil condition and boosting plant productivity. Research findings indicate that EM can positively influence the composition of soil microbial communities, enhance nutrient availability, suppress harmful microorganisms, and improve plant tolerance to environmental stress.

For instance, Zhang et al. (2022) and Singh et al. (2021) demonstrated that consortia of beneficial microbes-including *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Rhizobium*, and *Trichoderma*-support better soil aggregation, stimulate nitrogen fixation, and accelerate the

breakdown of organic matter [18]. Similarly, Kumar et al. (2023) reported that microbial formulations can reduce the need for mineral fertilizers without compromising yields, and in some cases even contribute to yield improvements [19].

Choudhary & Johri (2020) noted that many microorganisms synthesize biologically active compounds that enhance plant immune responses and increase resistance to both diseases and abiotic stressors such as salinity, drought, and temperature extremes. Experimental evidence presented by Gopalakrishnan et al. (2022) further confirms that microbial inoculants can raise soil organic matter levels and stimulate the activity of enzymes involved in nutrient transformations [7].

Alongside international research, recent studies conducted in Ukraine provide additional insights. Pavlo Pysarenko et al. (2024) examined the influence of probiotic treatments on the microbiological activity of typical chernozem soils and found that applying a 10% probiotic solution at a rate of 100 l/ha significantly increased the abundance of key microbial groups after 30 days, improving conditions for humus formation and the recovery of microbial communities [24]. Research by Olena Demyanyuk, Lyudmyla Symochko & Dmitry Shatsman (2020) analyzed the dynamics of soil microbiota across different ecosystems in Ukraine and showed that the combined use of mineral, organic, and biological fertilizers increased total microbial populations by approximately 1.3–4.1 times compared to unfertilized soils [25]. Iryna Bidnyha et al. (2025) investigated changes in soil organic matter under the combined influence of microbial preparations and tillage practices in southern Ukraine. Their results indicated that microbial agents accelerated straw decomposition by about 31% relative to the control and contributed to improved humus content, which in turn led to yield increases of 12.8–45.3% in grain sorghum [26].

A notable contribution to the advancement of sustainable agriculture in Ukraine has also been made by Tsytsiura Y.G. [27–28], whose work emphasizes the importance of crop rotation systems, green manure crops, and the biologization of farming practices in maintaining soil fertility. His studies highlight oilseed radish (*Raphanus sativus* var. *oleiformis*) as an effective cover crop that improves soil structure, supports nutrient cycling, and helps suppress soil-borne pathogens. Incorporating oilseed radish biomass into the soil has been shown to increase organic matter content, intensify microbial activity, and create favorable conditions for beneficial soil organisms. These findings support the idea of combining biologically active crops with microbial preparations in modern agroecosystems.

Despite the progress achieved, several aspects still require further investigation, including the selection of optimal microbial consortia for specific soil and climatic conditions, the mechanisms underlying plant–microbe interactions in systems involving cover crops such as oilseed radish, and the long-term impacts of such practices.

Accordingly, future research should focus on clarifying these processes, improving microbial formulations, and integrating effective microorganisms into sustainable agricultural technologies.

Identification of previously unresolved parts of the overall problem addressed in this article. Despite the growing body of research on effective microorganisms and microbial fertilizers, several key aspects remain insufficiently explored. In particular, there is limited understanding of the optimal composition and compatibility of microbial consortia under different soil and climatic conditions, as well as their long-term effects on soil fertility, microbial community dynamics, and crop productivity. The mechanisms of interaction between introduced microorganisms and native soil microbiota, especially under stress conditions, also require further investigation. In addition, the combined use of microbial preparations with cover crops, particularly oilseed radish (*Raphanus sativus* var. *oleiformis*), has not been sufficiently studied, especially in terms of rhizosphere processes, nutrient cycling, and stimulation of beneficial microorganisms.

The novelty of the study lies in the integrated assessment of effective microorganisms for restoring soil fertility and enhancing plant resilience, with an emphasis on their synergistic interaction with oilseed radish. The research substantiates the role of microbial fertilizers in improving nutrient cycling, soil structure, and plant defense mechanisms, while highlighting the combined effect of effective microorganisms and oilseed radish in accelerating soil restoration and strengthening agroecosystem stability.

Methodological or general scientific significance. The methodological approach of the study is grounded in a combination of general scientific principles and applied research techniques, which together ensure the robustness and reliability of the obtained results.

To achieve the stated objectives, the research employed a range of theoretical, empirical, and analytical methods. Theoretical tools, including analysis, synthesis, induction, deduction, and comparison, were used to examine existing scientific literature, clarify core concepts, and develop the conceptual framework of the study. Empirical methods, such as observation, expert assessment, and statistical data processing, were applied to gather and evaluate information on the investigated processes and to identify the influence of key factors.

Quantitative methods, including correlation–regression analysis and economic-mathematical modeling, were used to determine relationships between variables and to assess the dynamics of the main indicators. At the same time, qualitative methods—such as content analysis and expert evaluation—were used to interpret the findings and provide a deeper understanding of the observed phenomena. The use of systemic and comparative approaches allowed the research object to be viewed as an integrated system and made it possible to compare the obtained results with analogous practices in related contexts.

Particular emphasis was placed on the comprehensive evaluation of agroecosystems involving the use of effective microorganisms in combination with oilseed radish (*Raphanus sativus* var. *oleiformis*) as a cover crop. This enabled the assessment of the contribution of oilseed radish to soil structure improvement, stimulation of microbial activity, and enhancement of nutrient cycling processes, as well as the identification of synergistic interactions within the system.

The information base of the study consists of scientific works by national and international researchers, along with statistical data and analytical materials from relevant sources.

Presentation of the main material. Microbial fertilizers are widely recognized as a key component of modern biologized agriculture, as they rely on living microorganisms to support plant nutrition, stimulate physiological processes, and improve overall crop performance. Their use is closely associated with the enhancement of soil quality, including improvements in structure, biological activity, and nutrient availability, which are essential prerequisites for maintaining long-term soil fertility and sustainable production systems.

The action of microbial fertilizers is determined by the metabolic activity of introduced microorganisms within the soil environment. In the course of their development, these organisms produce a range of biologically active compounds, including enzymes, organic acids, and secondary metabolites, which actively influence the composition and functioning of the soil microbiome. As a result, the abundance of beneficial microorganisms increases, soil structure becomes more stable, and the availability of essential macronutrients—particularly nitrogen, phosphorus, and potassium—is improved [3,10].

Microbial communities included in biofertilizers perform distinct but complementary functions in soil processes. Nitrogen-fixing bacteria such as *Azotobacter*, *Rhizobium*, and *Azospirillum* are capable of converting atmospheric nitrogen into plant-available forms. Phosphate-solubilizing and potassium-mobilizing microorganisms facilitate the transformation of nutrients from insoluble to accessible forms. In addition, beneficial microorganisms such as *Trichoderma* spp. and *Bacillus* spp. contribute to the suppression of phytopathogens and help plants better withstand environmental stress.

Another important feature of microbial fertilizers is their ability to stabilize and support the structure of soil microbial communities, ensuring more efficient nutrient cycling and reducing the need for chemical inputs. Their efficiency becomes even more pronounced when combined with oilseed radish (*Raphanus sativus* var. *oleiformis*), which acts as a cover crop improving soil physical properties, increasing organic matter content, and stimulating microbial activity in the rhizosphere.

The joint application of microbial fertilizers and oilseed radish enhances nutrient dynamics, restricts the development of harmful microorganisms, and supports

the formation of a more balanced and resilient agroecosystem. Such integrated use demonstrates clear synergistic effects and aligns with the principles of sustainable and biologically oriented farming systems (Table 1).

The application of microbial fertilizers results in a significant increase in both the abundance and functional diversity of soil microorganisms, particularly those that provide direct benefits to plants. This shift in the soil microbiome contributes to improved soil physical properties, including enhanced aggregation and reduced compaction, while simultaneously increasing the bioavailability of essential nutrients such as nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K). In addition, microbial formulations play a protective role by limiting the proliferation of soil-borne pathogens and supporting overall plant health and vigor [3,10].

The effectiveness of microbial fertilizers is associated with several key biological mechanisms. These include atmospheric nitrogen fixation, solubilization of phosphorus compounds, and mobilization of potassium from mineral sources, all of which convert nutrients into plant-accessible forms. Furthermore, many beneficial microorganisms synthesize phytoactive compounds that stimulate root growth, improve nutrient uptake efficiency, and enhance plant resilience to abiotic stresses such as drought, salinity, and heavy metal contamination. The establishment of symbiotic associations—particularly with nitrogen-fixing bacteria and mycorrhizal fungi—further strengthens nutrient acquisition and contributes to stable and sustainable crop performance while reducing reliance on synthetic fertilizers.

Empirical studies confirm the positive impact of microbial inoculants on plant development and productivity. In particular, microbial combinations involving *Azospirillum brasilense*, *Bacillus subtilis*, and related strains have demonstrated improvements in vegetative growth, reproductive traits, and overall yield parameters in various agricultural crops [20]. These outcomes are largely attributed to enhanced nutrient cycling processes and the synthesis of phytohormones that regulate plant physiological functions.

Nitrogen is a fundamental element for plant growth; however, atmospheric nitrogen (N₂) is not directly accessible to plants. Through the process of biological nitrogen fixation, microorganisms such as *Rhizobium* spp. and free-living diazotrophs like *Azotobacter* convert atmospheric nitrogen into ammonia via the nitrogenase enzyme system, thereby enriching soil nitrogen content. Similarly, potassium-mobilizing microorganisms, including *Bacillus circulans*, *Bacillus mucilaginosus*, and *Bacillus edaphicus*, release potassium from insoluble mineral forms through the production of organic acids and mineral weathering processes, increasing its availability to plants.

Phosphorus availability in soils is often limited due to its presence in insoluble or strongly bound forms. Phosphate-solubilizing microorganisms, particularly species of *Bacillus* and *Pseudomonas*, secrete organic

Table 1

Microorganisms commonly present in microbial fertilizers and their functional roles

Type of microbial fertilizer	Main microorganisms	Function
Bacterial fertilizers (nitrogen-fixing)	<i>Azotobacter chroococcum</i> , <i>Azospirillum brasilense</i> , <i>Rhizobium spp.</i> , <i>Klebsiella spp.</i>	Convert atmospheric nitrogen (N ₂) into plant-available forms (ammonia, nitrates), thereby enhancing plant growth and improving soil nitrogen balance.
Phosphate-solubilizing bacteria	<i>Bacillus spp.</i> (<i>B. megaterium</i> , <i>B. cereus</i> , <i>B. mucilaginosus</i>), <i>Pseudomonas spp.</i> , <i>Rhodopseudomonas spp.</i> , <i>Klebsiella pneumoniae</i> , <i>Alcaligenes spp.</i> , <i>Serratia spp.</i> , <i>Thiobacillus spp.</i> (<i>Acidithiobacillus thiooxidans</i> , <i>Thiobacillus thioparus</i>)	Solubilize insoluble phosphorus compounds through the production of organic acids and enzymes, increasing phosphorus availability for plant uptake.
Potassium-mobilizing bacteria	<i>Bacillus edaphicus</i> , <i>Bacillus mucilaginosus</i>	Release potassium from mineral structures (silicates) via mineralization processes, increasing the pool of plant-available potassium in soil.
Lactic acid bacteria	Lactic acid bacteria (various genera)	Produce organic acids and antimicrobial substances that suppress soil pathogens, stimulate root development, and improve nutrient absorption.
Fungal fertilizers (mycorrhizal fungi)	Mycorrhizal fungi (Ascomycota and related groups)	Enhance nutrient and water uptake through symbiosis with plant roots, secrete enzymes and organic acids, improve soil aggregation and structure.
Actinomycete fertilizers	<i>Streptomyces spp.</i> (<i>S. jingyangensis</i> , <i>S. pactum</i> , etc.)	Produce bioactive compounds with antimicrobial properties, suppress phytopathogens, decompose organic matter, reduce soil bulk density, and improve soil physical characteristics.

acids and chelating agents that lower soil pH and facilitate the transformation of phosphorus into forms that can be readily absorbed by plants.

A promising approach in modern agroecosystem management involves the integrated use of microbial fertilizers with cover crops such as oilseed radish (*Raphanus sativus* var. *oleiformis*). Due to its extensive and well-developed root system, oilseed radish improves soil structure, alleviates compaction, and enhances the redistribution of nutrients within the soil profile. Its biomass contributes to organic matter accumulation and stimulates microbial activity in the rhizosphere. When combined with microbial fertilizers, oilseed radish intensifies rhizosphere interactions, promotes nutrient cycling, and supports the development of a stable and functionally active soil microbiome. This integrated strategy ultimately leads to improved soil fertility, increased crop productivity, and greater sustainability of agroecosystems.

Fig. 1 illustrates the interaction of *Pseudomonas* spp. with soil phosphorus minerals, demonstrating the secretion of organic acids that facilitate the dissolution of insoluble phosphate compounds.

Soil microorganisms constitute an essential part of the soil system, determining its biological activity, stability, and overall ecological functioning. Their importance becomes particularly evident in agroecosystems where oilseed radish (*Raphanus sativus* var. *oleiformis*) is grown, as this crop is highly sensitive to the condi-

tion of the soil microbiome. A well-balanced and active microbial community is therefore a critical prerequisite for its normal growth and development.

Any disturbances in the composition or activity of soil microorganisms can negatively affect oilseed radish. A decline in beneficial microbial populations disrupts soil processes, creates conditions favorable for the development of phytopathogens, and ultimately degrades the growing environment. Under such conditions, plants experience increased stress and are less able to realize their genetic productivity potential. At the same time, beneficial microorganisms contribute to plant protection by producing microbe-associated molecular signals (MAMPs), which are recognized by plants and trigger appropriate defense mechanisms, allowing them to respond effectively to both harmful and neutral microorganisms.

The diversity and abundance of beneficial soil microbes serve as important indicators of soil fertility and directly influence the performance of oilseed radish. A rich and active microbial community supports better root development, promotes biomass accumulation, and improves seed formation. The use of microbial fertilizers plays a significant role in this context, as it helps establish a more favorable rhizosphere environment around the root system of oilseed radish, increasing microbial diversity and overall biological activity. In addition, such fertilizers stimulate native soil microbiota and, together with organic amendments, create conditions

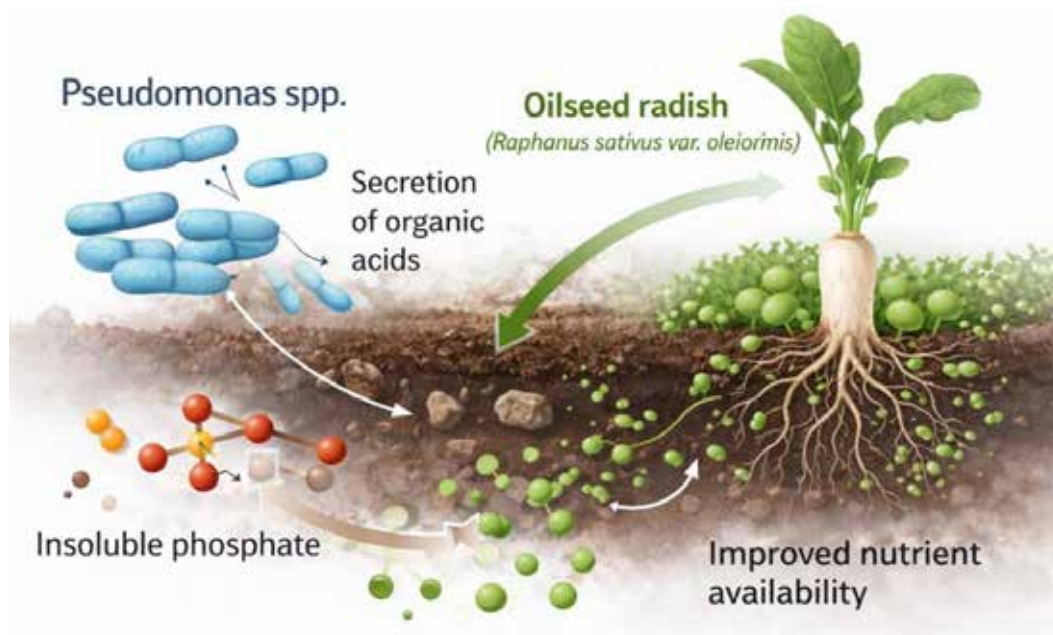


Fig.1. Interaction of *pseudomonas* spp. and oilseed radish (*Raphanus sativus* var. *oleiformis*) with soil phosphorus minerals

that better align with the physiological requirements of the crop. This contributes to improved nutrient availability, enhanced soil structure, and more effective plant establishment.

As shown in Fig. 2, these microbial communities also limit pathogen development through competitive interactions, improve soil aggregation, and increase the availability of key nutrients (N, P, K), thereby creating more favorable conditions for plant growth.

High-throughput sequencing of soil microbial communities following the application of microbial fertilizers enables a more comprehensive evaluation of the mechanisms that regulate microbial population dynamics in agroecosystems. This methodology is particularly relevant for oilseed radish (*Raphanus sativus* var. *oleiformis*), since its growth performance, root architecture, and yield formation are closely associated with the structure and functional activity of the soil microbiome. The introduction of microbial fertilizers promotes the proliferation of beneficial microorganisms, increases microbial diversity, enhances soil fertility, and helps maintain more stable and favorable conditions for oilseed radish cultivation [11,15,19].

In oilseed radish production systems, the prolonged and intensive use of mineral fertilizers may result in soil degradation processes, including compaction, decreased porosity, reduced aeration, and impaired water infiltration. These changes negatively affect root penetration and overall plant development. The application of microbial fertilizers mitigates these adverse effects by stimulating microbial activity, supporting biodiversity within the soil microbiome, and facilitating the formation of stable soil aggregates. Consequently, soil phys-

ical properties are improved, aeration is enhanced, and the root zone environment becomes more conducive to proper root growth. Moreover, microbial formulations that include halotolerant strains can help reduce the negative impact of soil salinity, further contributing to the optimization of growth conditions for oilseed radish.

Soil microorganisms, particularly bacteria and fungi, are essential for the formation and stabilization of soil aggregates, thereby improving soil structure and enhancing nutrient availability and uptake. This is especially relevant for oilseed radish (*Raphanus sativus* var. *oleiformis*), which requires accessible forms of nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K) to support biomass accumulation and yield formation.

Oilseed radish is susceptible to a wide range of pathogens; therefore, microbial fertilizers enriched with antagonistic microorganisms such as *Trichoderma* spp., *Pseudomonas aureofaciens*, and *Streptomyces* spp. are effectively used for biological disease control. These microorganisms suppress pathogens through competitive exclusion, production of antimicrobial metabolites, and inhibition of pathogen development. For instance, *Bacillus amyloliquefaciens* DH-4 produces thermostable compounds that disrupt pathogen cell structures, reducing infection pressure.

Through mechanisms including antibiosis and induced systemic resistance, microbial fertilizers enhance plant tolerance to biotic stress and improve overall plant health. In contrast, excessive use of chemical fertilizers and pesticides leads to soil degradation, compaction, and reduced biological activity, negatively affecting root development and nutrient uptake in oilseed radish systems.

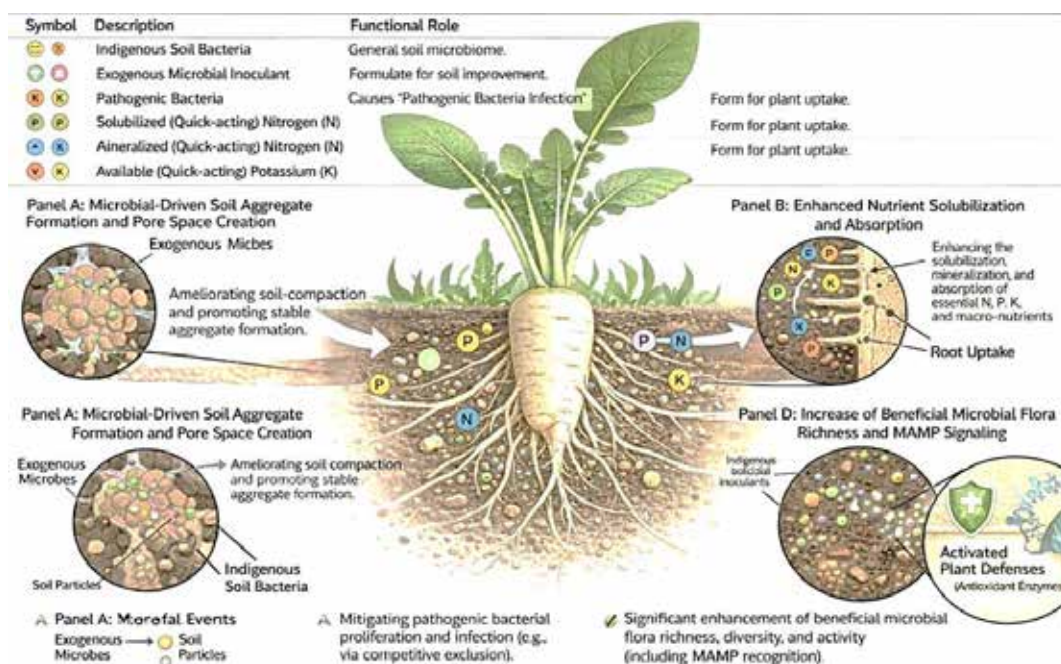


Fig. 2. The role of established microorganisms in shaping the productivity of oilseed radish (*Raphanus sativus* var. *oleiformis*)

Microbial fertilizers help mitigate these negative effects by stimulating microbial activity, decomposing pesticide residues, improving soil aeration, and restoring favorable conditions for root growth. Certain strains, such as *Pseudomonas pseudoalcaligenes* PS-5, are capable of degrading toxic compounds like ethyl parathion, contributing to soil detoxification. As a result, microbial inoculants enhance microbial diversity, improve soil physicochemical properties, and increase enzymatic activity, supporting plant resilience and soil functionality.

In addition, microbial fertilizers contribute to nutrient cycling and long-term soil health by promoting the decomposition of organic matter, the formation of stable soil aggregates, and the maintenance of a balanced microbial community. They also induce systemic resistance in plants, strengthening their defense mechanisms against various stress factors [13,19].

Recent studies highlight the effectiveness of microbial consortia in improving growth and stress tolerance of oilseed radish. In particular, inoculation with *Azospirillum brasilense*, *Bacillus subtilis*, and *Trichoderma harzianum* has been shown to increase biomass, enhance chlorophyll content, and improve resistance to drought and salinity stress [20,21]. These effects are particularly important for oilseed radish used in crop rotations and as a cover crop. Overall, microbial fertilizers enhance both plant productivity and resilience by activating multiple beneficial mechanisms, including induced systemic resistance (ISR), ensuring stable development under varying environmental conditions [22].

For instance, inoculation with *Trichoderma harzianum* has been shown to increase the activity of plant antioxidant enzymes by approximately 35–40%, thereby mitigating oxidative stress under drought and salinity conditions [23]. Similarly, *Bacillus subtilis* and *Azospirillum brasilense* stimulate root system development by promoting elongation and lateral branching, which enhances water and nutrient uptake; in treated plants, root length may increase by 20–25% compared to untreated controls [24].

Numerous studies confirm the beneficial effects of microbial fertilizers on crop performance under stress conditions. In sunflower, a microbial consortium consisting of *Azospirillum brasilense*, *Bacillus subtilis*, and *Mucilaginibacter polysaccharea* increased plant height by 15–18%, the number of flower heads by 12–15%, and seed yield by 20–22% [20]. In maize, inoculation with *Bacillus amyloliquefaciens* enhanced drought tolerance, leading to increases in biomass (18–20%) and grain yield (15–17%) compared to the control [25]. In wheat, phosphate- and potassium-solubilizing bacteria improved nutrient uptake by 10–12%, reduced disease incidence by about 30%, and contributed to more stable yield and grain quality [26,25].

In oilseed radish (*Raphanus sativus* var. *oleiferus*), the combined application of *Trichoderma harzianum* and *Bacillus subtilis* resulted in a ~25% increase in root biomass, a ~20% increase in shoot dry mass, and an 8–10% rise in seed oil content under moderate drought conditions.

Table 4 summarizes the principal microbial agents and their functional roles in enhancing plant stress tol-

Table 2

Major plant pathogens relevant to oil radish (*Raphanus sativus* var. *oleiformis*) and their suppression by beneficial microorganisms

Crop/Disease Context (including oil radish)	Main pathogenic microorganisms	Suppression by beneficial microorganisms
Fungal leaf and root diseases (incl. oil radish)	<i>Magnaporthe oryzae</i>	<i>Fusarium</i> spp., <i>Armillaria novae-zelandiae</i> , <i>Falciphora oryzae</i>
Grey mold (relevant to oil radish under влагні умови)	<i>Botrytis cinerea</i>	<i>Bacillus subtilis</i> , <i>Bacillus amyloliquefaciens</i>
Rust diseases (analogous risks in oil radish systems)	<i>Puccinia</i> spp.	<i>Doru luteipes</i>
Root rot and wilt diseases affecting oil radish	<i>Fusarium graminearum</i>	<i>Bacillus cereus</i> , <i>Azotobacter nigricans</i>
Vascular wilts (including potential threats to oil radish)	<i>Fusarium oxysporum</i>	<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>
Anthracnose-like diseases in Brassicaceae (incl. oil radish)	<i>Colletotrichum sublineolum</i>	<i>Trichoderma harzianum</i> , <i>Fusarium oxysporum</i> , beneficial protozoa

Table 3

Multifunctional EM fertilizers on soil and plant health with emphasis on oil radish (*Raphanus sativus* var. *oleiferus*)

Function	Mechanism	Outcome for Oil Radish (<i>Raphanus sativus</i> var. <i>oleiferus</i>)
Nitrogen fixation	Symbiotic (Rhizobia, Frankia) and free-living bacteria (Azotobacter, Azospirillum) convert atmospheric N ₂ to ammonia	Enhanced nitrogen availability supports rapid vegetative growth and biomass accumulation, important for root development and green mass of oil radish
Phosphate solubilization	Phosphate-solubilizing bacteria (Bacillus, Pseudomonas, Escherichia) release organic acids	Promotes stronger root system development, improves nutrient and water uptake, increases seed yield and oil content
Potassium mobilization	Potassium-solubilizing bacteria (Bacillus circulans, B. mucilaginosus) mineralize insoluble K	Enhances stress tolerance (drought, cold), ensures optimal accumulation of dry matter and oil in seeds
Biocontrol of pathogens	Antagonistic microorganisms (Trichoderma, Bacillus, Pseudomonas) compete with pathogens and produce antibiotics	Reduces incidence of root and foliar diseases, improves overall plant health and seed quality
Soil structure improvement	Microbial metabolites and fungal hyphae stabilize soil aggregates	Increases aeration and water retention, enhancing root growth and nutrient absorption, crucial for oil radish root development
Degradation of pollutants	Microbes such as Pseudomonas pseudoalcaligenes degrade pesticide residues	Detoxifies soil, supports microbial diversity, and improves the environmental safety of oil radish cultivation

erance and productivity, with particular emphasis on oil-seed radish. As presented, the effects of different microorganisms are mediated through mechanisms such as nutrient solubilization, biological nitrogen fixation, exopolysaccharide production, and induction of systemic resistance. In oilseed radish, these processes are especially pronounced, where inoculation with *Trichoderma harzianum*, *Bacillus subtilis*, and *Azospirillum brasilense* improves root elongation and branching by 20–25%, increases root and shoot biomass by 20–25%, and enhances seed oil content by 8–10% under moderate drought stress.

The cumulative effects of these microorganisms result in enhanced root development, improved nutrient uptake, and greater resilience against both biotic and abiotic stresses. By simultaneously influencing soil biological activity and plant physiological responses, microbial inoculants contribute to the establishment of a more stable and efficient plant–soil system. This integrated action supports balanced growth, optimizes resource utilization, and ultimately leads to improved crop performance under variable environmental conditions.

Figure 3 illustrates the relative contribution of various microbial groups to crop yield and stress tolerance.

Table 4

Microbial agents enhancing stress tolerance and productivity in oil radish and other crops

Microbial Agent	Type of Stress Mitigated	Mechanism	Observed Outcome for Oil Radish (<i>Raphanus sativus</i> var. <i>oleiferus</i>)
<i>Trichoderma harzianum</i>	Drought, salinity	Enhances antioxidant enzyme activity, induces systemic resistance	Antioxidant enzyme activity increased by 35–40%, reduced oxidative damage, higher root and shoot biomass (25% and 20% increase, respectively)
<i>Bacillus subtilis</i>	Drought, pathogen infection	Root growth stimulation, ISR activation, antibiotic production	Improved root elongation and branching (20–25% increase), reduced disease incidence, higher seed yield
<i>Azospirillum brasilense</i>	Nutrient limitation, drought	Nitrogen fixation, phytohormone production	Increased nutrient uptake (10–12%), enhanced vegetative growth, higher seed yield (8–10% increase in oil content)
<i>Mucilaginibacter polysaccharea</i>	Salinity, soil compaction	Production of exopolysaccharides, soil aggregation	Improved soil structure, better water retention, enhanced stress resilience for roots and shoots
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	Pathogens, drought	Antimicrobial compound production, ISR activation	Reduced disease incidence, improved drought tolerance, increased productivity and biomass accumulation

Nitrogen-fixing bacteria predominantly enhance yield by supplying assimilable nitrogen, whereas *Trichoderma* spp. and *Bacillus* spp. primarily strengthen plant resistance to pathogens and environmental stresses.

Additionally, the synergistic interaction between different functional groups of microorganisms further amplifies their overall effectiveness. When combined within microbial consortia, nitrogen-fixing, phosphate-solubilizing, and biocontrol microorganisms can simultaneously improve nutrient availability, stimulate plant growth regulators, and suppress pathogenic populations. This integrated functionality leads to more efficient colonization of the rhizosphere, enhanced microbial stability, and a more robust response of plants to environmental fluctuations, which is particularly important for maintaining consistent productivity in agroecosystems.

As illustrated in Fig. 3, different microbial groups contribute variably to the productivity and stress tolerance of oil radish (*Raphanus sativus* var. *oleiferus*) under moderate drought. *Trichoderma harzianum* shows the highest impact on enhancing stress tolerance, largely through improved antioxidant activity and biomass increase. Species within the *Bacillus* genus offer a balanced approach: *B. subtilis* significantly supports root growth, while *B. amyloliquefaciens* excels in increasing overall productivity through systemic resistance (ISR). *Azospirillum brasilense* also provides considerable benefits, with an 8–10% increase in seed oil content being notable.

Overall, the synergistic use of these diverse microbial groups in biofertilizers can maximize oil radish produc-

tivity and improve plant resistance to abiotic stressors like drought, highlighting the importance of integrating microbial-based solutions into sustainable agricultural practices for this crop.

Main conclusions. The study demonstrates that microbial fertilizers significantly enhance the diversity of beneficial microorganisms, which is critical for maintaining microecological balance and improving soil and plant health. Through the production of secondary metabolites, proteins, enzymes, and plant hormones, these fertilizers stimulate plant growth and enhance the uptake of essential nutrients such as nitrogen, phosphorus, and potassium.

These findings confirm the potential of microbial fertilizers as an effective and sustainable alternative to chemical fertilizers, promoting environmentally friendly agricultural practices. Further research should focus on: investigating the long-term effects of microbial fertilizers on soil microbial communities and crop productivity; optimizing formulations to target specific crops and environmental conditions; exploring the synergistic effects of combined microbial consortia to maximize nutrient availability and stress tolerance in plants; assessing the economic feasibility and scalability of microbial fertilizer applications in different agricultural systems.

Prospects for using the research results. The results of this study open new perspectives for the transition to sustainable and ecologically oriented agricultural technologies. Theoretical and practical conclusions can be used for: developing integrated crop protection and nutrition programs that combine

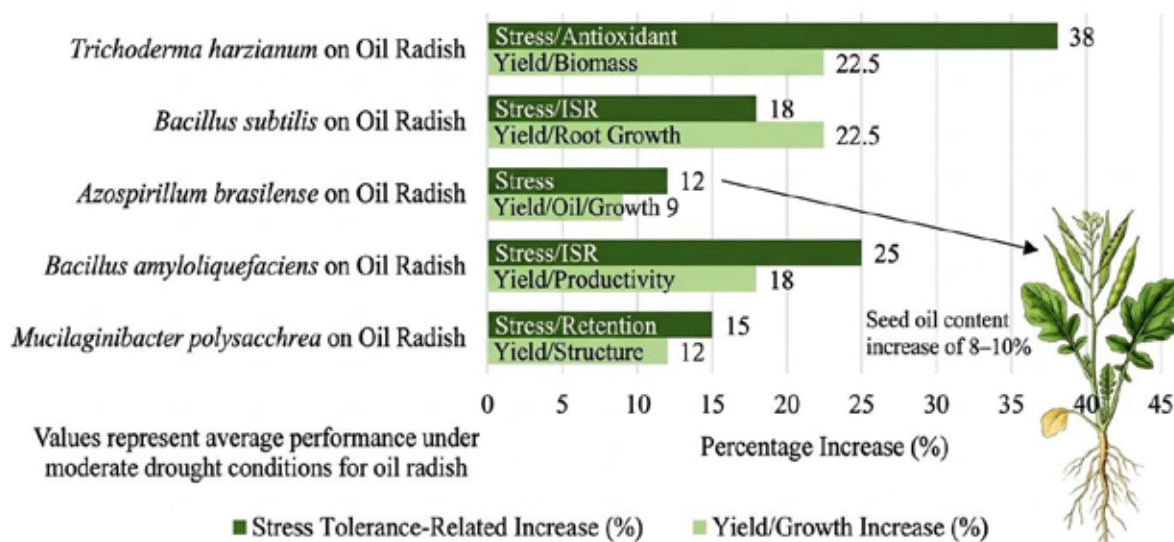


Fig. 3. Microbial effects on oil radish (*Raphanus sativus* var. *oleiferus*) under moderate drought

minimal required amounts of mineral fertilizers and pesticides with highly effective microbial preparations, aimed at achieving stable yields while minimizing environmental pressure; creating new targeted complex microbial consortia tailored to specific soil and climatic conditions of Ukraine and various crop rotation systems, ensuring maximum efficiency of biofertilizer application; substantiating strategies for restoring degraded and exhausted soils by identify-

ing key microbial groups capable of revitalizing the natural fertility of chernozems and other soil types; enhancing the competitiveness of Ukrainian agricultural production on the international market by implementing green technologies and reducing dependence on expensive chemical inputs.

Overall, integrating microbial fertilizers into modern agricultural practices offers promising prospects for sustainable crop production and soil health management.

References

1. Ковка Н. С. Теоретичні та практичні аспекти застосування технології ефективних мікроорганізмів (ЕМ). *Таврійський науковий вісник. Серія: Сільськогосподарські науки*. 2024. № 136. Ч. 1. С. 311–318. DOI: <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.136.1.38>
2. Кушніль О. В., Конечна Р. Т. Аспекти застосування мікробіологічних добрив. Наукова монографія. Рига, Латвія: «Baltija Publishing», 2023. С. 187–205. URL: <http://baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/download/344/9488/19780-1?inline=1> DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-329-3-10> (дата звернення: 20.02.2025)
3. Недільська У. І. Вплив мікроелементів на життєдіяльність рослин. Сучасний стан науки в сільському господарстві та природокористуванні: теорія і практика: зб. тез доп. II Міжнар. Наук. Інтернет-конф. Тернопіль: ЗУНУ, 2020. С. 124–126
4. Журавель С. В., Кравчук М. М., Кропивницький Р. Б., Клименко Т. В., та ін. Органічні добрива. *Бактеріальні добрива, регулятори росту*. 2020. С. 83–86
5. Стрілець О. П., Стрельников Л. С., Трутаєв І. В. Мікробіологічні добрива. Вивчення властивостей. Харків: *Національний фармацевтичний університет*, 2016. С. 578–581
6. Паламарчук І. П., Паламарчук І. І., Янович В. П. Технологічні аспекти використання ефективних мікроорганізмів у відновлюючих процесах. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету*. 2012. № 10 т.1 (58). С. 164–172
7. Aasfar A., Bargaz A., Yaakoubi K., Hilali A., Bennis I., Zeroual Y., Meftah Kadmiri I. Nitrogen fixing *Azotobacter* species as potential soil biological enhancers for crop nutrition and yield stability. *Front. Microbiol.*, 2021. 12
8. Assainar S. K., Abbott L. K., Mickan B. S., Whiteley A. S., Siddique K. H. M., Solaiman Z. M. Response of wheat to a multiple species microbial inoculant compared to fertilizer application. *Front. Plant Sci.*, 2018. 9. P. 416–134
9. Chaika T., Ponomarenko E. M. Technologies in organic farming: features and advantages. *Proceedings of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine*, 2015. 12. P. 104–109
10. Erktan A., Cécillon L., Graf F., Roumet C., Legout C., Rey F. Increase in soil aggregate stability along a Mediterranean successional gradient in severely eroded gully bed ecosystems: Combined effects of soil, root traits and plant community characteristics. *Plant Soil*, 2015. 398. P. 121–137
11. Farooq S., Danish S., Zafar-ul-Hye M., Mohsin F., Hussain M. ACC-deaminase producing plant growth promoting rhizobacteria and biochar mitigate adverse effects of drought stress on maize growth. *PLoS ONE*, 2020. 15. P. 205–212
12. Sarkar A., Ghosh P. K., Pramanik K., Mitra S., Soren T., Pandey S., Mondal M. H., Maiti T. K. A halotolerant *Enterobacter* sp. displaying ACC deaminase activity promotes rice seedling growth under salt stress. *Res. Microbiol.*, 2018. 169. P. 20–32
13. Tairo E. V., Ndakidemi P. A. Possible benefits of rhizobial inoculation and phosphorus supplementation on nutrition, growth and economic sustainability in grain legumes. *Am. J. Res. Commun.*, 2013. 1. P. 532–556

14. Vasylets K. K. The Use of Effective Microorganisms (EM) for the Production of High-Quality and Environmentally Safe Agricultural Products. Progressive Techniques and Technologies in Food Production, Restaurant and Hotel Management, and Trade. *Economic Strategy and Prospects for the Development of the Trade and Services Sector: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 45th Anniversary of KhSUCT*, October 18, 2012. Kharkiv: KhSUCT, Part 1. P. 443-444
15. Wang M., Zheng Q., Shen Q., Guo S. The critical role of potassium in plant stress response. *Int. J. Mol. Sci.*, 2013. 14. P. 7370–7390
16. Yang W., Gong T., Wang J., Li G., Liu Y., Zhen J., Ning M., Yue D., Du Z., Chen G. Effects of compound microbial fertilizer on soil characteristics and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.). *J. Soil Sci. Plant Nutr.*, 2020. 20. P. 2740–2748
17. Younas T., Umer M., Husnain Gondal A., Aziz H., Khan M. S., Jabbar A., Shahzad H., Panduro–Tenazoa N., Jamil M., Ore Areche F. A comprehensive review on the impact of microorganisms on soil and plant. *Journal of Bioresource Management*, 2022. 9(2). P. 109–118
18. Zhang C., Kong F. Isolation and identification of potassium–solubilizing bacteria from tobacco rhizospheric soil and their effect on tobacco plants. *Appl. Soil Ecol.*, 2014. 82. P. 18–25
19. Hang X., et al. Trichoderma-amended biofertilizer stimulates soil resident microbial taxa that promote crop yield. *NPJ Biofilms and Microbiomes*. 2022. 8, 57. URL: <https://www.nature.com/articles/s41522-022-00321-z> (дата звернення: 20.10.2025)
20. Poveda J. Combined use of Trichoderma and beneficial bacteria (*Bacillus*, *Pseudomonas*) with organic amendments to enhance disease suppression and soil health. *Crop Protection / review article*. 2022. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1049964422002651> (дата звернення: 20.10.2025)
21. Gopalakrishnan V. From the lab to the field: Combined application of plant-growth-promoting bacteria for mitigation of salinity stress in melon plants. *Agronomy (MDPI)*. 2022. 12(2), 408. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4395/12/2/408> (дата звернення: 20.10.2025)
22. Kumar S. Biofertilizers: An eco-friendly technology for nutrient supply and improving soil fertility (review). *Journal of Cleaner Production*. 2022. URL: <https://www.sciencedirect.com> (дата звернення: 20.10.2025)
23. Shahwar D. Role of microbial inoculants as bio-fertilizers for improving crop productivity and soil health: A review. *Sustainable Agriculture review*. 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/article/pii/S2405844023033418> (дата звернення: 20.10.2025)
24. Pysarenko P., et al. Effect of probiotic treatment on the microbiological activity of Ukrainian typical black soil. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences (JMBFS)*. 2024. URL: <https://office2.jmbfs.org/index.php/JMBFS/article/view/10263> (дата звернення: 20.10.2025)
25. Demyanyuk O., Symochko L., Shatsman D., et al. Structure and dynamics of soil microbial communities of natural and transformed ecosystems. *Environmental Research, Engineering and Management*. 2020. 76(4), 97–105. URL: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.ereem.76.4.23508> (дата звернення: 20.10.2025)
26. Bidyna I., Lykhovyd P., Pysarenko P., Hetman M., Karashchuk G. Soil organic matter transformation under the influence of microbial agents and tillage in grain and oil crops in Southern Ukraine. *Scientific Horizons*. 2025. 28(5), 9–19. URL: <https://surl.lt/pkvhpz> (дата звернення: 20.10.2025)
27. Цицюра Я.Г. Концепція застосування редьки олійної як сидерату за різних строків використання. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*. 2025. Вип.3(48). С. 104-117. DOI: <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2025-3.13>
28. Цицюра Я.Г. Потенціал і ефективність біофумігації ґрунту із застосуванням редьки олійної. *Український журнал природничих наук*. 2025. Вип.13. С. 327-339. DOI: <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.13.2025.31>

Дата першого надходження статті до видання: 23.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

ЕКОЛОГІЗАЦІЯ ХІМІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ МАЙБУТНІХ АГРОНОМІВ ЯК ОСНОВА ФОРМУВАННЯ ПРОФЕСІЙНОЇ КОМПЕТЕНТНОСТІ В УМОВАХ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Самар А.В.

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»
вул. Шевченка, 12, 32316, м. Кам'янець-Подільський
samarangelina02@gmail.com

Проведено дослідження теоретичних та методологічних засад екологізації хімічної освіти майбутніх фахівців аграрного сектору. Актуальність роботи зумовлена необхідністю подолання фундаментальних суперечностей між традиційними інтенсивними технологіями сільськогосподарського виробництва та сучасними імперативами сталого розвитку агросфери. Обґрунтовано, що екологізація хімічної підготовки є не просто додатковим освітнім компонентом, а базовим чинником формування цілісної професійної компетентності агронома нової формації. В основу концепції покладено системну інтеграцію дванадцяти принципів «Зеленої хімії» (Green Chemistry) у зміст фундаментальних дисциплін: неорганічної, органічної, аналітичної та фізико-колоїдної хімії. У теоретичному вимірі екологізація трактується як наскрізна лінія, що трансформує суто хімічні знання у глибоке розуміння механізмів біогеохімічної міграції речовин в агроєкосистемах, кінетики біодеградації ксенобіотиків та термодинамічної стійкості ґрунтового вбирального комплексу. Окрему увагу приділено структурному аналізу поняття «еколого-хімічна компетентність агронома». Розроблено структурно-функціональну модель компетентності, яка включає когнітивний блок (знання про глобальні цикли Нітрогену, Фосфору та Карбону), операційний блок (здатність до хімічного моделювання агрозаходів із мінімізацією енерговтрат) та аксіологічний блок (здатність до критичної оцінки хімічних інновацій через призму екологічного ризику). В експериментальному та методологічному аспектах у роботі проаналізовано змістове наповнення навчальних програм та запропоновано конкретні еколого-орієнтовані дескриптори для кожного розділу хімії. Висновки дослідження акцентують на тому, що впровадження моделі екологізованої підготовки є стратегічним інструментом забезпечення екологічної та продовольчої безпеки України в умовах повоєнної відбудови, кліматичної нестабільності та суворих вимог Європейського зеленого курсу щодо якості аграрної продукції. *Ключові слова:* екологізація освіти, хімічна підготовка агрономів, сталий розвиток, професійна компетентність, агросфера, Зелена хімія, еколого-хімічний моніторинг, зміст освіти у ВНЗ.

The ecologization of chemical training for future agronomists as the foundation for the formation of professional competence in the context of sustainable development. Samar A.

This article presents a comprehensive study of the theoretical and methodological foundations for the ecologization of chemical education for future specialists in the agricultural sector. The relevance of this work stems from the need to resolve fundamental contradictions between traditional intensive agricultural production technologies and the contemporary imperatives of sustainable development in the agrosphere. It is argued that the greening of chemical training is not merely an additional educational component, but a fundamental factor in the formation of the holistic professional competence of the new generation of agronomists. The concept is based on the systematic integration of the twelve principles of «Green Chemistry» into the content of fundamental disciplines: inorganic, organic, analytical and physical and colloidal chemistry. In theoretical terms, greening is interpreted as a cross-cutting theme that transforms purely chemical knowledge into a deep understanding of the mechanisms of biogeochemical migration of substances in agroecosystems, the kinetics of xenobiotic biodegradation, and the thermodynamic stability of the soil absorbing complex. Particular attention is paid to the structural analysis of the concept of «eco-chemical competence of an agronomist». A structural-functional model of competence has been developed, comprising a cognitive component (knowledge of the global cycles of nitrogen, phosphorus and carbon), an operational block (the ability to perform chemical modeling of agricultural practices whilst minimising energy losses) and an axiological block (the ability to critically evaluate chemical innovations through the prism of environmental risk). In the experimental and methodological aspects of the study, the content of the curricula has been analysed and specific ecology-oriented descriptors have been proposed for each section of chemistry. The study's findings emphasise that the implementation of an eco-friendly training model is a strategic tool for ensuring Ukraine's environmental and food security in the context of post-war reconstruction, climate instability and the stringent requirements of the European Green Deal regarding the quality of agricultural produce. *Key words:* ecologization of education, chemical training of agronomists, sustainable development, professional competence, agricultural sector, Green Chemistry, eco-chemical monitoring, content of education in HEI.

Постановка проблеми. Сучасна парадигма вищої аграрної освіти вимагає докорінного перегляду концептуальних підходів до викладання природничих дисциплін. Екологізація хімічної освіти постає як комплексна трансформація всієї дидак-

тичної системи, що передбачає перехід від техноцентричної до екоцентричної моделі навчання. Це вимагає змістовної корекції кожного розділу хімічної науки для формування фахівця, здатного до критичного оцінювання науково-технічного прогресу.



Актуальність дослідження. Зумовлена необхідністю подолання суперечностей між традиційною інтенсифікацією сільського господарства та вимогами екологічної безпеки агросфери. В умовах глобальних кліматичних змін та євроінтеграційних вимог модернізація хімічної освіти стає стратегічним інструментом забезпечення безпеки держави. Особливої гостроти проблема хімічного забруднення ґрунтів набуває в умовах воєнного та поствоєнного стану України.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Робота безпосередньо пов'язана з реалізацією Європейського зеленого курсу, стратегії «Від ферми до вилки» та нормами Закону України «Про охорону навколишнього природного середовища». Дослідження сприяє імплементації державних програм щодо раціонального природокористування та підготовки фахівців, здатних реалізувати «зелений» енергетичний перехід України.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Українська наукова думка (Н. Пустовіт, С. Шмалей, О. Пінчук) заклала фундамент для розуміння екологізації як загальнопедагогічного принципу. Питання формування екологічної компетентності агрономів розглядалися Н. Гладковою та Г. Мазуренко. Світова практика (Університет Хоенгайм, Вагенінгенський університет) базується на концепціях «Circular Economy» та валоризації біомаси. Принципи «Зеленої хімії» як нова філософія освіти досліджувались Ф. Тихоміровою та О. Зацерковною.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Попри значний доробок, потребує глибшого вивчення системний взаємозв'язок між рівнем хімічної грамотності та практичною екологічною відповідальністю агронома. Недостатньо розробленими залишаються конкретні методики трансформації змісту неорганічної, органічної та фізико-колоїдної хімії відповідно до принципів декарбонізації та сталого землекористування.

Новизна. Полягає у системному обґрунтуванні екологізації хімічної підготовки як фундаментального чинника професійної компетентності. Запропоновано перехід від описового вивчення елементів до аналізу біогеохімічних циклів, механізмів хелатування та біодеградації ксенобіотиків безпосередньо у змісті хімічних дисциплін.

Методологічне або загальнонаукове значення. Базується на системному та компетентнісному підходах. Теоретичний фундамент спирається на принципи наскрізної інтеграції знань, де будь-яке хімічне явище розглядається в контексті його біосферного циклу. Використано методи аналізу навчальних програм для виокремлення еколого-орієнтованих дескрипторів.

Виклад основного матеріалу. Трансформація змісту хімічної освіти в Україні відбувається не

ізолювано, а в тісному зв'язку з міжнародними зобов'язаннями та нормативно-правовими актами. Визначальним вектором тут виступає Європейський зелений курс (European Green Deal), який ставить за мету досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року [1]. Для аграрної освіти це означає імплементацію стратегії «Від ферми до вилки» (Farm to Fork Strategy), що передбачає скорочення використання хімічних пестицидів на 50% та добрив на 20% [2]. Освітній процес має готувати фахівця, який здатен реалізувати ці цілі на практиці, що вимагає принципово нового рівня хімічної підготовки.

Внутрішньодержавне нормативне поле, зокрема Закон України «Про вищу освіту» та Стратегія сталого розвитку України, створює легітимну базу для автономії університетів у розробці екологізованих програм. Оновлені стандарти вищої освіти за спеціальністю «Агрономія» вже включають екологічну компетентність як обов'язковий результат навчання. Хімічна освіта стає ключовим інструментом виконання державних екологічних програм щодо охорони ґрунтів та раціонального природокористування [3]. Отже, законодавче закріплення екологічних пріоритетів створює необхідні умови для системного оновлення хімічних дисциплін, перетворюючи їх на дієвий механізм реалізації екологічної політики держави.

Сучасна парадигма вищої аграрної освіти вимагає докорінного перегляду концептуальних підходів до викладання природничих дисциплін, серед яких хімія посідає провідне місце. Екологізація змісту хімічної освіти не може розглядатися як вузьке доповнення навчальних планів окремими темами про забруднення довкілля; вона постає як комплексна трансформація всієї дидактичної системи. В основі цієї трансформації лежить перехід від традиційної техноцентричної моделі навчання, де хімія слугує лише інструментом інтенсифікації виробництва, до екоцентричної моделі, де хімічні знання стають запобіжником екологічної дестабілізації агроландшафтів [4].

Теоретичний фундамент екологізації базується на принципі наскрізної інтеграції знань. Це означає, що будь-яке хімічне явище розглядається в контексті його біосферного циклу. Наприклад, вивчення термодинамічних закономірностей чи кінетики реакцій має супроводжуватися аналізом енергетичних балансів в екосистемах та швидкістю розкладу ксенобіотиків у природних умовах [5]. Таким чином, хімічна освіта набуває футурологічного спрямування, навчаючи майбутнього агронома прогнозувати віддалені наслідки локального хімічного впливу на ґрунтове середовище та суміжні природні сфери.

Центральним елементом теоретичної бази екологізації виступає концепція «Зеленої хімії» (Green Chemistry), яка у 2026 році стала визначальним стандартом для світової наукової спільноти. При впровадженні цієї концепції в освітній процес аграрного

профілю акцент зміщується з методів очищення відходів на методи їхнього запобігання. Для майбутнього фахівця це означає опанування стратегій вибору найменш токсичних реагентів, використання каталітичних процесів замість стехіометричних та впровадження принципів атомної ефективності [1]. Хімічна підготовка у такому форматі стає основою для розуміння технологій точного землеробства, де кожен міліграм внесеної речовини має бути хімічно обґрунтованим і біологічно доступним.

Важливим теоретичним аспектом є також формування нової структури професійної компетентності агронома. Еколого-хімічна компетентність розглядається як складна інтегративна характеристика особистості, що поєднує глибокі фундаментальні знання з етичною відповідальністю за стан біосфери. У цьому контексті хімічна освіта виконує гуманістичну функцію, оскільки вона виховує фахівця, здатного до критичного оцінювання науково-технічного прогресу. Теоретична модель такої підготовки передбачає розвиток системного мислення, при якому агроном сприймає поле не як механічний субстрат для вирощування рослин, а як динамічну хімічну систему, де врівноважені процеси іонного обміну, адсорбції та мікробіологічної трансформації речовин [6].

Крім того, екологізація змісту передбачає посилення міжпредметної координації хімії з біологією, екологією та токсикологією. Це дозволяє уникнути фрагментарності знань і сформувати у студентів цілісну природничо-наукову картину світу. Теоретичне обґрунтування такого підходу базується на ідеї єдності хімічного складу живої та неживої природи, що дозволяє розглядати агрохімікати як активні агенти, здатні втручатися в метаболічні шляхи організмів на молекулярному рівні [7]. Саме таке глибоке розуміння хімізму взаємодії речовин стає гарантом екологічної безпеки майбутньої професійної діяльності агронома в умовах глобальних кліматичних та екологічних викликів.

Реалізація стратегії екологізації вимагає змістовної корекції кожного розділу хімічної науки, що викладається майбутнім агрономам. У межах вивчення неорганічної хімії акцент зміщується з описової характеристики елементів на дослідження їхньої біогеохімічної ролі. Особлива увага приділяється хімії важких металів та мікроелементів, де теоретичний розгляд властивостей d-елементів тісно пов'язується з їхньою здатністю до комплексоутворення у ґрунтовому розчині.

Традиційне вивчення хімічних елементів варто замінити на аналіз хімічних циклів та біодоступності. Наприклад, замість загальних властивостей d-елементів доцільно звернути увагу на глибоке вивчення хелатування. Хелатні мікродобрива є основою сталого землеробства, оскільки вони мінімізують осадження іонів у ґрунті. Під час вивчення теми «Окисно-відновні реакції» зробити акцент на хіміч-

ній трансформації Нітрогену (нітрифікація та денітрифікація) та управлінні цими процесами через інгібітори, що дозволяє зменшити викиди оксиду азоту (I) (сильного парникового газу). У темі «Розчини» варто пояснити принцип хімічної меліорації, обґрунтувати розрахунок доз вапна чи гіпсу не як механічне завдання, а як моделювання рівноваги ґрунтового розчину для захисту корисного мікробіому.

Це дозволяє здобувачам освіти зрозуміти, як зміна кислотності або окисно-відновного потенціалу середовища впливає на рухливість токсикантів та їхнє надходження у рослинну продукцію [8]. Хімізм процесів гідролізу та сольового обміну розглядається як інструмент керування родючістю, що запобігає деградації ґрунтового вбирання.

Органічна хімія в системі екологізованої підготовки трансформується у фундамент для розуміння функціонування агросфери на молекулярному рівні. Вивчення органічних сполук не обмежується номенклатурою та синтезом, а фокусується на природних полімерах, таких як гумінові та фульвокислоти, що визначають екологічну стійкість ґрунтів [9]. Окремий масив теоретичного матеріалу присвячується хімії синтетичних пестицидів, де структура молекули аналізується через призму її персистентності в довкіллі. Майбутні фахівці вивчають механізми фотохімічної та мікробіологічної деградації органічних забруднювачів, що дозволяє їм усвідомлено обирати препарати з мінімальним періодом напіврозпаду, забезпечуючи виробництво екологічно безпечної продукції.

Аналітична та фізико-колоїдна хімія в оновленому змісті стають методологічною базою для екологічного моніторингу. Теоретичний опис адсорбційних процесів та іонного обміну безпосередньо експонується на здатність ґрунту утримувати поживні речовини та фільтрувати потенційні забруднювачі підземних вод. Тому тему «Адсорбція» доцільно модернізувати вивченням ґрунтового вбирального комплексу як динамічної іонообмінної колонії. Студенти мають вміти розраховувати ємність катіонного обміну, щоб зрозуміти, яку «хімічну чергу» створюють добрива у ґрунті. Вивчення колоїдних систем дає розуміння стійкості ґрунтових агрегатів до ерозійних процесів, а методи фізико-хімічного аналізу розглядаються як засоби експрес-діагностики стану агроценозів [10]. Вивчення фізико-хімії сучасних форм препаратів (мікрокапсульовані суспензії, наноемульсії) дозволили б зрозуміти, як зменшити норму внесення діючої речовини при збереженні її ефективності. Таким чином, кожна хімічна дисципліна стає невід'ємною ланкою у формуванні системного екологічного світогляду агронома [11].

Формування професійної компетентності фахівця аграрного профілю в умовах екологізації освіти є складним процесом, що охоплює інтелектуальну, практичну та ціннісну сфери особистості. Теоретична модель цієї компетентності включає когнітивний блок, який базується на глибокому розу-

мінні хімічних законів як фундаментальних принципів існування живої природи. Студент має не просто оперувати формулами, а бачити за ними динаміку речовин у глобальних циклах Нітрогену, Фосфору та Карбону. Це знання трансформується в операційний блок, де агроном демонструє здатність до хімічного моделювання агротехнічних заходів, мінімізуючи втрати енергії та речовини.

Важливою складовою моделі є аксіологічний компонент, який визначає етичну позицію майбутнього агронома у ставленні до хімічних інструментів впливу на природу. В умовах сталого розвитку професійна компетентність передбачає здатність до критичної оцінки інновацій та відмову від економічно вигідних, але екологічно небезпечних рішень. Модель передбачає, що хімічна грамотність стає основою для прийняття управлінських рішень, спрямованих на збереження біорізноманіття та здоров'я споживачів. Така підготовка формує інтелектуально розвиненого фахівця, який усвідомлює межі допустимого хімічного втручання в біосферні процеси [12].

Головні висновки та перспективи використання результатів дослідження. Підбиваючи підсумок теоретичного аналізу проблеми екологізації змісту хімічної освіти, слід зазначити, що цей процес є об'єктивною вимогою часу. Впровадження принципів Зеленої хімії та інтеграція екологічних аспектів у фундаментальну хімічну підготовку агрономів дозволяє подолати вузькоспеціалізований підхід до навчання. Сформована у такий спосіб професійна компетентність забезпечує готовність майбутніх фахівців до впровадження технологій сталого землеробства, що є життєво необхідним для збереження природного капіталу України.

Перспективи подальших наукових пошуків полягають у розробці конкретних навчально-методичних комплексів та підручників нового покоління, де хімічна теорія буде повністю інтегрована з практикою екологічного менеджменту агроландшафтів. Розвиток цього напрямку сприятиме створенню цілісної системи неперервної екологізованої освіти, що відповідає європейським стандартам підготовки фахівців аграрного сектору.

Література

1. Презентовано проект Концепції «зеленого» енергетичного переходу України до 2050 року. *Кабінет Міністрів України*. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/prezentovano-proekt-koncepciyi-zelenogo-energetichnogo-perehodu-ukrayini-do-2050-roku> (дата звернення: 02.02.2026).
2. Стратегія «Від ферми до вилки»: для справедливої, здорової та екологічно чистої продовольчої системи : робочий документ Європейської Комісії. 2020. 23 с. URL: https://organicinfo.ua/wp-content/uploads/2021/05/EU_Farm-to-Fork-Strategy-UA_fin.pdf (дата звернення: 16.03.2026).
3. Про вищу освіту : Закон України від 01 лип. 2014 р. № 1556-VII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-18> (дата звернення: 15.02.2026).
4. Тихомірова Ф. А. Зелена хімія: нова хімічна філософія. *Вісник ОНУ. Хімія*. 2015. Т. 20, вип. 2 (54). С. 93–98.
5. Гладкова Н. В. Формування екологічної компетентності майбутніх агрономів у процесі вивчення природничих дисциплін. *Педагогіка формування творчої особистості у вищій і загальноосвітній школах*. 2020. № 70, Т. 1. С. 154–158.
6. Зацерковна О. П. Інтеграція принципів зеленої хімії в навчальний процес аграрних ЗВО. *Вісник Житомирського державного університету імені Івана Франка. Педагогічні науки*. 2023. Вип. 2 (113). С. 45–54.
7. Євтушок Н. М. Роль хімічної підготовки у формуванні фахової компетентності майбутнього агронома. *Інноваційна педагогіка*. 2021. Вип. 34. С. 82–86.
8. Станкевич С. В. Екологічна токсикологія пестицидів : навч. посібник. Харків : ХНАУ, 2021. 254 с.
9. Мазуренко Г. А. Хімічна підготовка студентів агрономічних спеціальностей на засадах екоцентричного підходу. *Природнична освіта і наука*. 2022. Вип. 5. С. 112–119.
10. Толочко С. В. Екологізація неперервної професійної освіти фахівців аграрної галузі. *Освіта дорослих: теорія, досвід, перспективи*. 2019. Вип. 1 (15). С. 134–143.
11. Tuck C. O., Perez E., Horvath I. T. et al. Valorization of Biomass: deriving more value from waste. *Science*. 2012. Vol. 337, no 609. Pp. 695–699. DOI: <http://dx.doi.org/10.1126/science.1218930>.
12. Герланд Т. Екологізація професійної освіти майбутніх спеціалістів у контексті повоєнної відбудови України. *Професійна та безперервна освіта*. Вип. 9. С. 427–438. DOI: <https://doi.org/10.71358/ezu.2228>.

Дата першого надходження статті до видання: 20.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ У ЕМПІРИЧНИХ ТА НАУКОВО-ДОСЛІДНИХ ЗАВДАННЯХ ГЕОЛОГІЇ РОДОВИЩ ВУГЛЕВОДНІВ

Владимиров Р.В.

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
майд. Свободи, 4, 61022, м. Харків
postgraduate241991@gmail.com

У статті розглянуто теоретичні та прикладні аспекти використання математичного моделювання у емпіричних і науково-дослідних завданнях геології родовищ вуглеводнів. Обґрунтовано значення математичних методів як універсального інструменту дослідження складних геологічних систем, що забезпечує можливість кількісного опису процесів формування, міграції та акумуляції вуглеводнів у надрах. Висвітлено роль математичного моделювання у створенні цифрових моделей родовищ, оцінці фізико-хімічних властивостей колекторів і прогнозуванні поведінки пластових флюїдів у процесі розробки покладів нафти і газу.

Особливу увагу приділено розмежуванню емпіричних і фундаментальних науково-дослідних застосувань математичного моделювання, яке дозволяє більш чітко визначити методологічні можливості цієї галузі та підвищити ефективність використання математичних моделей у геологічній практиці. Показано, що емпіричне моделювання базується на використанні фактичних даних польових спостережень і лабораторних досліджень та застосовується для побудови геологічних і гідродинамічних моделей родовищ, тоді як науково-дослідне моделювання спрямоване на прогнозування геологічних процесів, формування нових наукових гіпотез і визначення закономірностей розвитку нафтогазових систем.

Крім цього, проаналізовано сучасні напрями розвитку математичного моделювання у геології родовищ вуглеводнів, зокрема геостатистичне, гідродинамічне, геохімічне та термодинамічне моделювання, а також використання методів машинного навчання і штучного інтелекту для обробки великих масивів геологічних даних. Визначено, що інтеграція різних типів моделей у єдину інформаційну систему дозволяє підвищити точність геологічних прогнозів, оптимізувати параметри розробки родовищ і забезпечити ефективне використання ресурсів надр.

Практичне значення дослідження полягає у можливості застосування результатів математичного моделювання під час планування геологорозвідувальних робіт, оцінки перспективності територій для пошуку нафти і газу, визначення параметрів буріння та прогнозування продуктивності свердловин. *Ключові слова:* математичне моделювання, геологія родовищ вуглеводнів, гідродинамічне моделювання, геостатистика, геохімічне моделювання, машинне навчання, характеристика резервуарів.

Mathematical modeling in empirical and research problems of hydrocarbon fields geology. Vladimirov R.

The article considers theoretical and applied aspects of the use of mathematical modeling in empirical and research tasks of the geology of hydrocarbon deposits. The importance of mathematical methods as a universal tool for studying complex geological systems is substantiated, which provides the possibility of quantitatively describing the processes of formation, migration and accumulation of hydrocarbons in the subsoil. The role of mathematical modeling in creating digital models of deposits, assessing the physicochemical properties of reservoirs and predicting the behavior of reservoir fluids in the process of developing oil and gas deposits is highlighted.

Particular attention is paid to the distinction between empirical and fundamental research applications of mathematical modeling, which allows us to more clearly determine the methodological capabilities of this field and increase the efficiency of using mathematical models in geological practice. It is shown that empirical modeling is based on the use of actual data from field observations and laboratory studies and is used to build geological and hydrodynamic models of deposits, while scientific and research modeling is aimed at predicting geological processes, forming new scientific hypotheses and determining the patterns of development of oil and gas systems.

In addition, modern directions of development of mathematical modeling in the geology of hydrocarbon deposits are analyzed, in particular geostatistical, hydrodynamic, geochemical and thermodynamic modeling, as well as the use of machine learning and artificial intelligence methods for processing large amounts of geological data. It is determined that the integration of different types of models into a single information system allows to increase the accuracy of geological forecasts, optimize the parameters of field development and ensure the effective use of subsoil resources.

The practical significance of the study lies in the possibility of applying the results of mathematical modeling when planning geological exploration, assessing the prospects of territories for oil and gas exploration, determining drilling parameters and predicting well productivity. *Key words:* mathematical modeling, geology of hydrocarbon deposits, hydrodynamic modeling, geostatistics, geochemical modeling, machine learning, reservoir characterization.



Постановка проблеми. Розвиток геології родовищ вуглеводнів характеризується постійним ускладненням умов дослідження надр та зростанням вимог до точності геологічних прогнозів. Формування родовищ нафти і газу є результатом тривалих геологічних процесів, які включають седиментацію, діагенез, тектонічні рухи, міграцію вуглеводнів та їх накопичення у пастках різного типу. Вивчення цих процесів у природних умовах пов'язане з високим рівнем невизначеності, що обумовлює необхідність використання математичних методів для їх кількісного опису [1-3].

Традиційні геологічні дослідження, засновані на польових спостереженнях і лабораторному аналізі зразків, не завжди забезпечують повне розуміння закономірностей формування родовищ [4, 5]. Особливо складними є випадки, коли геологічна структура характеризується значною неоднорідністю, складною стратиграфією або наявністю тектонічних порушень. У таких умовах математичне моделювання стає необхідним інструментом, що дозволяє відтворити просторову структуру резервуарів, оцінити їх фільтраційні властивості та спрогнозувати поведінку пластових флюїдів.

Використання математичного моделювання в геології родовищ вуглеводнів дозволяє створювати цифрові моделі надр, які відображають фізичні та хімічні властивості порід, параметри пластових систем і умови їх експлуатації. Такі моделі забезпечують основу для прийняття інженерних і економічних рішень, пов'язаних із розвідкою та розробкою родовищ.

Таким чином, конкретизація змісту поняття «математичне моделювання» у геології родовищ вуглеводнів, а також систематизація його емпіричних і науково-дослідних застосувань є практично значущим завданням.

Актуальність дослідження. Світова практика свідчить, що значна частина запасів вуглеводнів знаходиться у складних геологічних умовах, де традиційні методи розвідки не забезпечують достатньої точності прогнозів. У зв'язку з цим особливого значення набуває застосування математичних моделей, які дозволяють оцінити перспективність територій, оптимізувати параметри буріння та підвищити коефіцієнт вилучення вуглеводнів [6, 7].

Поява методів машинного навчання й штучного інтелекту відкриває принципово нові можливості для автоматизованої характеристики колекторів, розпізнавання геологічних образів у великих масивах сейсмічних атрибутів та прогнозування продуктивності свердловин. За таких умов системний аналіз методологічних основ математичного моделювання в геології вуглеводневих родовищ набуває не лише теоретичного, але й суто прикладного значення.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Застосування сучасних методів моделювання у поєд-

нанні з детальним аналізом геологічної будови родовищ є основою для розробки науково обґрунтованих рекомендацій щодо підвищення нафтогазовилучення на родовищах України. Отримані результати можуть бути використані при плануванні та оцінці геологорозвідувальних робіт.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання математичного моделювання, у геології родовищ вуглеводнів, займає провідне місце серед наукових напрямів, спрямованих на підвищення ефективності розвідки та розробки нафтових і газових покладів. Дослідження останніх років свідчать про активний розвиток методів чисельного аналізу, геостатистичного моделювання та цифрових технологій, що дозволяють більш точно відтворювати геологічні процеси та прогнозувати поведінку резервуарів [4, 8].

Важливий внесок у розвиток теорії геостатистичного моделювання зробили дослідники Chiles J.-P., Delfiner P., які обґрунтували застосування статистичних методів для оцінки просторової мінливості властивостей гірських порід та визначення параметрів колекторів. У їхніх роботах показано, що використання геостатистичних алгоритмів дозволяє враховувати неоднорідність пластів і формувати ймовірнісні моделі розподілу пористості та проникності, що суттєво підвищує точність прогнозування запасів вуглеводнів [1].

Термодинамічне моделювання вуглеводневих систем, зокрема двовимірні математичні моделі для прогнозування утворення відкладень з парів вуглеводнів, демонструють широкий спектр застосувань математичного моделювання – від поверхневих промислових установок до підземних резервуарів [7].

У галузі чисельного моделювання геологічних процесів значна увага приділяється використанню методів математичної фізики для опису динаміки геологічних систем. Розроблено концепції побудови моделей геодинамічних процесів, які враховують теплові, механічні та гідродинамічні фактори формування родовищ. У таких дослідженнях доведено, що застосування чисельних методів дозволяє моделювати розвиток басейнів осадконакопичення, прогнозувати утворення пасток вуглеводнів та визначати умови їх збереження у надрах [2].

Особливу увагу сучасні дослідники приділяють використанню гідродинамічного моделювання для аналізу процесів фільтрації пластових флюїдів. У роботах, присвячених дослідженню продуктивності свердловин, показано, що математичні моделі дозволяють відновлювати роботу свердловин і оптимізувати режими експлуатації родовищ, забезпечуючи підвищення економічної ефективності видобутку [4].

Окремий напрям досліджень пов'язаний із застосуванням методів машинного навчання для аналізу геологічних даних. Сучасні алгоритми дозволяють автоматично класифікувати типи гірських порід,

визначати літологічні характеристики та прогнозувати параметри резервуарів. Використання таких підходів значно розширює можливості математичного моделювання і сприяє підвищенню точності геологічних прогнозів [8].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Незважаючи на інтенсивний розвиток математичного моделювання у геології, низка важливих проблем залишається недостатньо дослідженою. Однією з них є необхідність інтеграції різних типів моделей у єдину систему, здатну відображати складні взаємозв'язки між геологічними, фізичними та технологічними параметрами родовищ. У більшості випадків геологічні, гідродинамічні та геохімічні моделі розробляються окремо, що ускладнює їх використання для комплексного аналізу процесів формування та розробки родовищ.

Тобто, питання комплексного використання моделей для вирішення емпіричних і науково-дослідних завдань геології родовищ вуглеводнів залишається актуальним і потребує подальшого розвитку.

Новизна. Наукова новизна роботи полягає у систематизованому розмежуванні емпіричних і фундаментальних науково-дослідних застосувань математичного моделювання в геології родовищ вуглеводнів, яке ґрунтується на аналізі кола вирішуваних задач, типів використовуваних математичних методів та характеру параметрів геологічних систем, що встановлюються або прогножуються.

Методологічне або загальнонаукове значення. У роботі математичне моделювання розглядається як універсальний інструмент, який забезпечує можливість інтеграції різних типів даних і створення комплексних моделей геологічних систем. Воно дозволяє досліджувати взаємодію між геологічними структурами, пластовими флюїдами та технологічними процесами видобутку, що є необхідною умовою для розробки ефективних стратегій освоєння родовищ.

З загальнонаукового погляду, стаття демонструє продуктивність системного підходу до аналізу методологічного контексту, конкретної наукової дисципліни – виявлення внутрішньої структури методів, їхніх взаємозв'язків, меж застосовності та перспектив розвитку. Такий підхід може бути перенесений на аналогічні задачі систематизації методологічного інструментарію в суміжних геологічних дисциплінах.

Викладення основного матеріалу. Математичне моделювання у геології родовищ вуглеводнів є складним багаторівневим процесом, який поєднує методи математичної фізики, статистики, геології та інженерії для створення узагальненого опису природних систем надр. Його основною метою є кількісне відтворення геологічної будови родовищ, визначення фізичних параметрів колекторів і прогнозування динаміки руху пластових флюїдів у процесі експлуатації. У сучасних умовах розвиток математичного моделювання тісно пов'язаний із цифровізацією

геологічних досліджень, що дозволяє використовувати великі обсяги даних та застосовувати чисельні методи для вирішення складних наукових і виробничих завдань.

Фундаментальне математичне моделювання у геології родовищ вуглеводнів охоплює широкий спектр аналітичних задач, спрямованих на кількісний опис динамічних процесів формування нафтогазових систем. Воно включає аналіз температурних умов утворення органічної речовини, визначення швидкості міграції вуглеводнів, оцінку умов їх акумуляції та збереження у геологічних структурах. Такий підхід дозволяє розглядати родовище не як статичний об'єкт, а як динамічну систему, що змінюється під впливом геологічних і техногенних факторів.

Особливе місце у сучасній геології займає геологічне моделювання, яке полягає у створенні тривимірних цифрових моделей родовищ на основі даних буріння, геофізичних досліджень і лабораторних аналізів. Такі моделі дозволяють визначати геометрію пластів, встановлювати межі колекторів і оцінювати їх фізичні властивості. Використання цифрових технологій забезпечує можливість візуалізації геологічних структур і аналізу їх просторових характеристик, що значно підвищує ефективність геолого-розвідувальних робіт.

Важливим напрямом математичного моделювання є гідродинамічне моделювання, яке застосовується для дослідження процесів фільтрації пластових флюїдів і визначення режимів експлуатації родовищ. У межах цього підходу використовуються рівняння руху рідини у пористому середовищі, які враховують вплив тиску, температури та фізичних властивостей порід. Математичні моделі дозволяють прогнозувати зміну пластового тиску, визначати швидкість руху флюїдів і оцінювати ефективність різних технологічних заходів, спрямованих на підвищення нафтовіддачі [5].

Застосування математичних методів у геології родовищ вуглеводнів передбачає використання чисельних алгоритмів для розв'язання складних систем рівнянь, що описують поведінку геологічних систем. Одним із найважливіших параметрів, який визначається у процесі моделювання, є коефіцієнт проникності порід, що характеризує їх здатність пропускати рідину. Цей параметр залежить від структури порового простору, гранулометричного складу порід і ступеня їх цементування. Визначення проникності є необхідною умовою для оцінки продуктивності свердловин і планування режимів їх роботи.

Сучасні дослідження показують, що ефективність математичного моделювання значною мірою залежить від якості вихідних даних. До таких даних належать результати геофізичних досліджень свердловин, сейсмічні матеріали, дані лабораторного аналізу кернів і показники експлуатації родовищ.

Інтеграція цих даних у єдину інформаційну систему дозволяє створювати комплексні моделі, які відображають реальні умови формування та розробки родовищ.

Крім цього, важливим елементом математичного моделювання є використання термодинамічних моделей, які описують процеси фазових переходів вуглеводнів у пластових умовах. Такі моделі дозволяють визначати температуру і тиск, при яких відбувається конденсація або випаровування флюїдів, а також прогнозувати утворення відкладень у трубопроводах і технологічному обладнанні. У практиці нафтогазової галузі це має важливе значення для забезпечення безперервності видобутку і зниження витрат на технічне обслуговування.

Також, на даний час, у практиці геологічних досліджень значного поширення набули методи машинного навчання та штучного інтелекту, які використовуються для аналізу великих масивів даних. Алгоритми машинного навчання дозволяють автоматично визначати закономірності у розподілі геологічних параметрів і прогнозувати поведінку резервуарів за різних умов експлуатації. Використання таких технологій сприяє підвищенню точності геологічних прогнозів і зменшенню ризиків, пов'язаних із розробкою родовищ [4, 8].

В цілому, у процесі розробки родовищ особливу увагу приділяють оцінці геологічних ризиків, які можуть впливати на ефективність видобутку. Математичні моделі дозволяють визначати ймовірність виникнення небезпечних явищ, таких як прорив води або газу, обвалення порід і зниження продуктивності свердловин. Використання таких моделей забезпечує можливість своєчасного прийняття управлінських рішень і запобігання аварійним ситуаціям.

Важливу роль у геології відіграє моделювання напружено-деформованого стану гірських масивів, яке дозволяє прогнозувати зміни геологічних структур під впливом техногенних навантажень. Такі моделі використовуються для визначення стабільності пластів, оцінки ризику руйнування порід і планування заходів щодо забезпечення безпеки робіт.

Суттєвим елементом математичного моделювання є оцінка економічної ефективності розробки родовищ. У цьому випадку моделі використовуються для визначення оптимальних параметрів буріння, вибору технологій видобутку і розрахунку витрат на експлуатацію родовищ. Інтеграція економічних показників у математичні моделі дозволяє оцінювати рентабельність проектів і приймати обґрунтовані інвестиційні рішення. Для наочного відображення ролі математичного моделювання у геології родовищ вуглеводнів представимо узагальнену структуру використання моделей у процесі дослідження та розробки родовищ (табл. 1).

В цілому, розмежування емпіричних і науково-дослідних застосувань математичного моделювання є принципово важливим для правильного розуміння методологічних можливостей галузі. Емпіричне моделювання, як правило, спирається на безпосередньо виміряні або визначені за промисловими даними параметри і вирішує задачі кількісної інтерполяції та апроксимації: побудова геологічних моделей за даними свердловин, адаптація гідродинамічних моделей до фактичної історії розробки, побудова PVT-моделей за результатами лабораторних досліджень проб флюїдів. Науково-дослідне моделювання, натомість, виходить за межі наявних прямих спостережень і вирішує задачі прогнозу, генерації гіпотез та перевірки теорій: моделювання генерації та міграції вуглеводнів у геологічному часі, чисельне дослідження механізмів формування пасток, прогнозування розподілу порід-колекторів у необурених районах.

Таким чином, математичне моделювання виступає універсальним інструментом дослідження геологічних систем і забезпечує можливість комплексного аналізу процесів формування та експлуатації родовищ вуглеводнів. Його використання дозволяє підвищити точність геологічних прогнозів, оптимізувати технологічні рішення і забезпечити ефективне використання ресурсів надр.

Головні висновки. Математичне моделювання у геології родовищ вуглеводнів є комплексним методологічним інструментом, що об'єднує геоло-

Таблиця 1

Основні напрями застосування математичного моделювання у геології родовищ вуглеводнів

Напрямок моделювання	Основні параметри	Практичне значення
Геологічне моделювання	Структура пластів, товщина, літологія.	Оцінка запасів і визначення меж родовища.
Гідродинамічне моделювання	Тиск, швидкість фільтрації, насиченість.	Прогнозування видобутку і режимів експлуатації.
Геостатистичне моделювання	Пористість, проникність, неоднорідність.	Оцінка просторової мінливості властивостей порід.
Термодинамічне моделювання	Температура, фазовий стан флюїдів.	Запобігання утворенню відкладень і оптимізація технологічних процесів.
Економічне моделювання	Витрати, прибуток, рентабельність.	Обґрунтування інвестиційних рішень.

гічне та гідродинамічне моделювання, геостатистику, геохімічне та термодинамічне моделювання, а також методи машинного навчання. Кожен із цих напрямів вирішує специфічне коло задач і оперує власним математичним апаратом, однак усі вони є взаємодоповнювальними елементами єдиного комплексу моделювання нафтогазової системи. Фундаментальне математичне моделювання охоплює значно ширший спектр аналітичних завдань, ніж геометрична інтерполяція просторових даних, спрямовуючись насамперед на кількісний опис динамічних процесів і генезису нафтогазових систем.

Розмежування між емпіричними та науково-дослідними застосуваннями математичного моделювання є методологічно важливим: перші спираються на прямі спостереження і вирішують задачі інтерполяції та апроксимації, тоді як другі виходять за межі наявних даних, прогнозуючи явища і процеси, недоступні безпосередньому спостереженню. Виявлені за допомогою моделювання закономірності будови й розвитку родовищ є основою для наукового обґрунтування раціональних стратегій геологорозвідувальних робіт і розробки покладів.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати дослідження можуть бути використані у різних напрямках розвитку геології родовищ вуглеводнів і суміжних галузей науки та техніки. Насамперед вони можуть бути застосовані під час планування геологорозвідувальних робіт і оцінки перспективності нових територій для пошуку нафти і газу. Використання математичних моделей дозволяє визначати найбільш імовірні зони накопичення вуглеводнів і оптимізувати розміщення свердловин, що сприяє підвищенню ефективності геологічних досліджень.

У загальному контексті, запропонована класифікація методів та їхніх застосувань може слугувати основою для формування уніфікованих стандартів геологічного моделювання та вимог до звітної документації при підрахунку запасів. Перспективним є подальший розвиток інтегрованих підходів до моделювання – поєднання фізично обґрунтованих моделей з методами машинного навчання в гібридних архітектурах, що дозволяють враховувати фізичні обмеження та водночас опрацьовувати великі масиви промислових даних.

Література

1. Chilès J.-P., Delfiner P. *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*. 2nd ed. Hoboken : *John Wiley & Sons*, 2012. 730 p. ISBN 978-0-470-18315-1.
2. Gerya T. V. *Introduction to Numerical Geodynamic Modelling*. 2nd ed. Cambridge : *Cambridge University Press*, 2019. 471 p. ISBN 978-1-107-14314-2.
3. Hantschel T., Kauerauf A. I. *Fundamentals of Basin and Petroleum Systems Modeling*. Berlin ; Heidelberg : *Springer*, 2009. XVI + 476 p. ISBN 978-3-540-72317-2.
4. Shevtsov V. M., Asadova Kh. B., Djamilov A. F., Omonov S., Abdurakhmonova S. Geological and hydrodynamic modeling as a tool for improving the methodology of designing the development of hydrocarbon deposits at the final stage. *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 410. P. 05029. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341005029>
5. Maučec M., Yarus J. M., Chambers R. L. Next Generation Geological Modeling for Hydrocarbon Reservoir Characterization. *InTech*, 2011. <https://doi.org/10.5772/27275>
6. Qiao Y. Quantitative Simulation of Hydrocarbon Migration. *Earth Science – Journal of China University of Geosciences*. 2005. Vol. 30, No. 2. P. 183–188.
7. Zhang W., Watkinson A. P. Carbonaceous Material Deposition from Heavy Hydrocarbon Vapors. 2. Mathematical Modeling. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2005. Vol. 44, No. 11. P. 4092–4098. <https://doi.org/10.1021/ie0490334>
8. Solanke B., Onita F. B., Ochulor O. J., Iriogbe H. O. Techniques for improved reservoir characterization using advanced geological modeling in the oil and gas industry. *International Journal of Applied Research in Social Sciences*. 2024. Vol. 6, No. 9. P. 2060–2088. <https://doi.org/10.51594/ijarss.v6i9.1542>

Дата першого надходження статті до видання: 30.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

РОЗРОБКА ІНТЕГРАЛЬНОГО КРИТЕРІЮ ЕКОЛОГІЧНОЇ ЗБАЛАНСОВАНOSTІ ТЕРИТОРІЇ ДЛЯ КАР'ЄРНОЇ ТА ЗМІШАНОЇ СИСТЕМ РОЗРОБКИ (НА ПРИКЛАДІ ГУЛЯЙПІЛЬСЬКОГО РОДОВИЩА)

Касьяненко Д.Л.¹, Улицький О.А.², Дяченко Н.О.³

¹ Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, 03035, м. Київ

² ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України»
пр. Академіка Палладіна, 34А, 03142, Київ

³ ДУ «Науковий центр гірничої геології, геоелектрології та розвитку інфраструктури НАН України»
бульв. Академіка Вернадського 34Б, 03142, м. Київ
law@kasyanenko.com.ua, olegulytsky@gmail.com, natalidyachenko1969@gmail.com

Вивчено геометрію відкритих гірничих виробок під час розрахунку габаритів кар'єру у плані з урахуванням глибини та кута укосу бортів кар'єру, розроблено інтегральний критерій екологічної збалансованості території (I_{es}) для оцінки кар'єрної та змішаної систем розробки родовищ корисних копалин на прикладі Гуляйпільського родовища залізистих кварцитів. Інтегральна оцінка в дослідженнях – це сумарний поширений індекс, що пов'язує екологічні показники стану довкілля, техногенні параметри виробничої діяльності та технологічні характеристики способу розробки. Обґрунтовано необхідність переходу від окремих екологічних показників до узагальненого інтегрального індексу, який враховує геоморфологічні, гідрогеологічні, геохімічні та техногенні параметри. Запропоновано адитивну модель інтегрального критерію з нормуванням показників методом min–max та визначенням ваг методом попарних порівнянь. У праці проаналізовані концептуальні відмінності технологічних систем видобутку корисних копалин, означено формалізовану математичну модель порівняння двох сценаріїв освоєння родовища: повністю кар'єрного (до 600 м) та комбінованого (кар'єр до 400 м із подальшим переходом на підземну розробку). Вперше до умов досліджуваного родовища запропоновано екологічний коефіцієнт економії (Кесо), що інтегрує площинні, об'ємні та гідрогеологічні параметри впливу. Для коректної оцінки екологічних наслідків видобутку залізистих кварцитів Гуляйпільського родовища емпірично обґрунтовано доцільність комбінованого способу розробок. Запропоновано екологічний коефіцієнт економії, що інтегрує площинні, об'ємні та гідрогеологічні параметри. Зазначено, що змішана система розробки забезпечує зменшення сукупного екологічного навантаження на близько 50% порівняно з повною кар'єрною схемою, а значення I_{es} переходить у межі екологічно допустимого рівня. *Ключові слова:* інтегральний критерій, Гуляйпільське родовище, екологічний коефіцієнт економії, сценарії освоєння, змішана система розробки.

Development of an integral criterion of ecological balance of the territory for quarry and mixed development systems (on the example of the Gulyaipil deposit). Kasyanenko D. Ulytskyi O. Dyachenko N.

The geometry of open pit mines was studied when calculating the dimensions of the quarry in the plan, taking into account the depth and angle of slope of the sides of the quarry, and an integral criterion of ecological balance of the territory (IES) was developed for the assessment of quarry and mixed systems of development of mineral deposits using the example of the Gulyaipil iron quartzite deposit. Integral assessment in research – is a combined common index linking environmental indicators of the state of the environment, man-made parameters of production activity and technological characteristics of the method of development. The need to move from individual ecological indicators to a generalized integral index, which takes into account geomorphological, hydrogeological, geochemical and man-made parameters, is substantiated. An additive model of the integral criterion with normalization of indicators by the min–max method and determination of weights by the method of pairwise comparisons is proposed. The work analyzes the conceptual differences of technological systems of mineral extraction, defines a formalized mathematical model for comparing two scenarios of deposit development: fully quarried (up to 600 m) and combined (quarry up to 400 m with subsequent transition to underground development). For the first time, an ecological saving factor (Keco) integrating planar, volumetric and hydrogeological impact parameters was proposed to the conditions of the studied deposit. For the correct assessment of the ecological consequences of the extraction of ferruginous quartzites of the Gulyaipil deposit, the ecological expediency of the combined method of development is empirically substantiated. An ecological saving factor integrating planar, volumetric and hydrogeological parameters is proposed. It is noted that the mixed development system provides a reduction of the aggregate environmental load by about 50% compared to the full career scheme, and the value of the IES goes beyond the environmentally acceptable level. *Key words:* integral criterion, Gulyaipil deposit, ecological coefficient of economy, development scenarios, mixed system

Вступ. Здійснені дослідження щодо інтегральної оцінки екологічних наслідків гірничої діяльності, порівняння технологій розробки та побудови екологічних індексів, а також короткі узагальнення їх методів і висновків [1-3], в яких автори порівнюють екологічні наслідки кар'єрної (відкритої) та підземної розробок корисних копалин за низкою параметрів; оцінюють комбіновані технології розробки, що можуть зменшити сумарний екологічний вплив на довкілля за належного вибору граничних глибин. На основі проведеного факторного аналізу розраховані інтегральні індекси складових управління екологічною безпекою засвідчили, що змішана технологія істотно впливає на зниження площинного та екологічного ризиків. При правильному технічному обґрунтуванні комбінована схема може бути оптимальним варіантом для середньо- та глибоких покладів, підтверджуючи практичну ефективність методології інтегральних індикаторів, що дозволяють простежити зміну рівня економіко-екологічної безпеки ПРАТ «Північний ГЗК», ПРАТ «Центральний ГЗК» та ПРАТ «Інгулецький ГЗК».

Сучасні виклики у вирішенні питання видобутку залізистих кварцитів Гуляйпільського родовища полягає у формуванні такої технологічної схеми освоєння надр, що забезпечить мінімізацію трансформації природних геосистем, раціональне використання водних ресурсів та зниження площі техногенного порушення території. Вибір способу розробки (відкритий, підземний або комбінований) безпосередньо визначає масштаби ландшафтних змін, гідрогеологічні наслідки та інтенсивність антропогенного навантаження.

Система показників екологічної рівноваги для Гуляйпільського родовища має базуватися на геометричних параметрах кінцевого контуру кар'єру; балансі підземних вод і коефіцієнті їх повторного використання; обсягах розкриття та техногенного навантаження і можливості поетапного переходу до підземної стадії. Але обґрунтування екологічної рівноваги території під час розробки залізистих кварцитів не може обмежуватися лише геометрією кар'єру та гідрогеологічними параметрами.

Екологічна рівновага гірничопромислової території формується як інтегрований результат взаємодії геометричних параметрів розробки, тектонічної структури масиву та геохімічної активності порід, а врахування цих чинників у виборі технології видобутку забезпечує підвищення інтегрального показника екологічної збалансованості на етапах експлуатації та рекультивції.

Саме тому **мета праці** - розробити та апробувати інтегральний критерій екологічної збалансованості території для порівняльної оцінки кар'єрної та змішаної систем розробок залізистих кварцитів і кількісно обґрунтувати екологічну доцільність комбінованої технологічної схеми для Гуляйпільського родовища.

Об'єкт дослідження - гірничопромислова територія в межах Гуляйпільського родовища за різних технологічних схем освоєння надр.

Предмет дослідження - особливості формування екологічної збалансованості території під впливом геометричних параметрів кар'єру, обсягів розкривних робіт, змін гідрогеологічного режиму та інших техногенно зумовлених факторів при кар'єрній і змішаній системах розробки.

Методи дослідження. Методи дослідження: 1. Математичні - розрахунок площинних та об'ємних показників техногенного впливу; оцінка гідрогеологічного впливу на основі залежності радіуса депресійної лійки від глибини розробки; нормування показників методом min-max; визначення вагових коефіцієнтів методом попарних порівнянь (експертна оцінка); розрахунок інтегрального критерію екологічної збалансованості території (I_{ES}) та розрахунок екологічного коефіцієнта економії (K_{eco}). 2. Аналітичні - порівняльна оцінка кар'єрної та змішаної систем розробки та формалізація екологічної доцільності комбінованої технологічної схеми розробки корисних копалин.

Викладення основного матеріалу досліджень. Для оцінки екологічної збалансованості території необхідним є показник який показує наскільки територія є екологічно збалансованою або дестабілізованою. Таким показником може бути інтегральний критерій екологічної збалансованості території (I_{ES}) для кар'єрної, шахтної та змішаної систем розробки (в залежності від технології розробки корисної копалини).

Власне інтегральний критерій – це узагальнений кількісний показник, що об'єднує декілька екологічних параметрів у єдину оцінку стану території. Тобто замість окремих категорій: концентрації забруднювачів, рівня підземних вод, площі деградованих земель, інтенсивності ерозії, втрати біорізноманіття, тектонічно-гідрогеохімічне різноманіття ми формуємо єдиний показник, який відображає наскільки територія є екологічно збалансованою або дестабілізованою.

Система розробки родовища (кар'єр, шахта чи змішана схема) має фундаментальний вплив на формування рівня екологічного стану гірничопромислової території. Він мультикомпонентний та охоплює площу просторового порушення; трансформацію гідрогеологічного режиму; геохімічні зміни середовища; біотичну відновлюваність; динаміку геомеханічної стабільності.

Інтегральний критерій екологічної збалансованості I_{ES} в нашому випадку має охоплювати кожну з цих складових у системі показників і дозволяти робити порівняння технологічних схем у єдиному вимірі. Одразу визначимося, що не оцінюватимемо біотичну відновлюваність, бо ж за відсутності моніторингових спостережень за змінами цього показника такі родовища ще не розроблялися.

Інтегральна оцінка в дослідженнях передбачає сумарний поширений індекс, що пов'язує екологічні показники стану довкілля, техногенні параметри виробничої діяльності та технологічні характеристики способу розробки. Класичні підходи комплексних індексних систем в різних сферах діяльності були використані в численних дослідженнях [4]. В роботі [5] визначено, що індексні методи в цілому – це розрахункові, кількісні методи, пов'язані з визначенням одиничних індексів (коефіцієнтів) за ключовими показниками й аспектами діяльності та їх зведенням до інтегрального показника. Залежно від методики аналізу застосування цих методів можна передбачати як проведення досить складних розрахунків, так і простих математичних операцій. В той же час, інтегральний метод дозволяє отримати однозначні оцінки позицій; є досить простим і наочним, але не дає можливості для глибокого аналізу. Складні системи часто передбачають розбиття індивідуальних індикаторів на підгрупи для точнішого аналізу.

Базою для розробки показника інтегральної оцінки виступають екологічні показники, розроблені Європейською Економічною Комісією ООН «Керівництво щодо застосування екологічних показників у країнах Східної Європи, Кавказу та Центральної Азії», «Директива Європейського парламенту та Ради Європейського Союзу № 2000/60/ЄС від 23 жовтня 2000 року» (Водна рамкова директива ЄС) [6, 7], та положення чинного законодавства, нормативно-правових документів стосовно створення Державної системи моніторингу довкілля і затверджених порядків та положень щодо його проведення.

Основні підходи до інтегральної оцінки можуть включати різні коефіцієнти, наприклад коефіцієнт екологічної стабільності [8]:

$$E_{кс} = \frac{\sum P_i B_i}{\sum P_i}$$

де: P_i – площа, B_i – бал стабільності.

Це може бути інтегральний показник стану довкілля (Ппідс):

$$Ппідс = \frac{П_{вод} + П_{зем} + П_{атм}}{3},$$

де: P – індекси стану води, землі та атмосфери.

Як правило, інтегральний критерій для оцінки екологічної збалансованості території розглядають як адитивну модель з окремими складовими (в загальному вигляді):

$$I_{ES} = \omega_1 G + \omega_2 H + \omega_3 T + \omega_4 K_{tect} + \omega_5 K_{geo} \quad (1)$$

де: G – геоморфологічна стабільність; H – гідрогеологічна стабільність; T – техногенне навантаження; K_{tect} – тектонічний параметр порушеності; K_{geo} – геохімічний стабілізуючий показник; ω_i – це вага показника i , яка визначає ступінь впливу цього показника на інтегральний результат.

Такий критерій розширює класичні підходи шляхом включення структурно-тектонічної та геохімічної компонент.

Методика нормування показників полягає в наступному. Щоб уникнути неоднорідності одиниць виміру, кожний показник нормується у діапазоні $[0; 1]$ за методом стимулюючих (чим більше – тим краще) та дестимулюючих (чим менше – тим краще) показників:

Стимулюючі показники:

$$x_i = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

Дестимулюючі показники:

$$x_i = 1 - \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

де: $X_{(max - min)}$ – показник площі порушень або засолення та ін.

Це стандартний підхід, що використовується в індексі екологічної ефективності (EPI - Environmental Performance Index) та багатьох міжнародних шкалах оцінки екологічних ризиків. Це метод кількісної оцінки та рейтингу, що базується на більш ніж 20 показниках, які вимірюють екологічний стан та ефективність державної екологічної політики країн світу. Його розробили фахівці Єльського та Колумбійського університетів для оцінки здоров'я екосистем та кліматичної політики. Індекс публікується 1 раз на 2 роки [9].

Ваги ω_i визначаються методом попарних порівнянь, узгодженим із групою експертів з екології, гірничих технологій та гідрогеології.

Аналіз численних досліджень, у яких порівнюються технологічні впливи на екологію у відкритих та підземних розробках, засвідчив [2, 10], що існують концептуальні відмінності технологічних систем видобування корисних копалин. Результати показують, що відкрита розробка родовищ має більш видимі наслідки (деградація ґрунтів і повітря), тоді як підземна розробка родовищ створює приховані, але більш токсичні наслідки (забруднення води та професійні ризики) (табл. 1).

Тому дослідження родовища має окремі особливості: передбачена розробка - кар'єр; пропонується технологія - змішана розробка (кар'єр до 400-500 м + шахта глибше). Морфометричні зміни поверхні рельєфу великі за рахунок контурів кар'єру (значно більший за рудні тіла). Структурно-тектонічні зони не чітко означені, але вплив гідродинаміки доволі значущий. В цьому випадку, домінантною складовою буде комбінація великих морфометричних змін та гідрохімічних і гідрогеологічних ефектів. Змішана схема дозволить мінімізувати площу поверхневого порушення.

Для коректної оцінки екологічних наслідків розробки корисних копалин необхідне емпіричне обґрунтування екологічної доцільності комбінова-

Таблиця 1

Концептуальні відмінності технологічних систем

Компонент критерію	Кар'єрна схема	Шахтна схема	Змішана схема
Площа поверхневого порушення	Найбільша	Мінімальна	Помірна
Зміна гідрогеології	Висока (велика депресійна лійка)	Специфічна, локальна депресійна лійка	Помірна депресійна лійка
Ризик геохімічної мобілізації	Високий	Середній (локальний)	Середній
Тектонічні ризики	Менш критичні	Найбільш значущі	Значущі
Економічна ефективність	Висока для неглибоких покладів	Вища при глибоких покладах	Оптимальна

Таблиця 2.

Вихідні параметри (Гуляйпільське родовище)

Вихідні параметри	Показники
Площа родовища	936 га
Протяжність пласта	17 км
Глибина оцінки запасів	600 м
Середня потужність розкриву	120 м
Коефіцієнт розкриву	1,1 м ³ /м ³
Прогнозна глибина кар'єру (сценарій 1)	600 м
Комбінований варіант (сценарій 2)	до 400 м – кар'єр, 400+ м – підземна розробка

ного способу розробки для та Гуляйпільського родовища залізистих кварцитів.

Математична модель порівняння технологій розробки.

В дослідженні розроблено формалізований розрахунок - математична модель порівняння двох сценаріїв розробки та інтеграцію в інтегральний критерій екологічної збалансованості для Гуляйпільського родовища. Сценарій 1 – кар'єр до глибини 600 м. Сценарій 2 – комбінований варіант: до 400 м – кар'єр, 400+ м – підземна розробка (табл. 2).

Сценарій 1 – повністю кар'єрна розробка до 600 м

Із геометрії відкритих гірничих виробок при розрахунку габаритів кар'єру у плані з урахуванням глибини та кута укосу бортів використовуються параметри кар'єру, які визначаються:

$$L_d = L_{dp} + 2H_k \operatorname{ctg} \gamma$$

$$B_p = B_d + 2H_k \operatorname{ctg} \gamma$$

де: L_d – довжина кар'єру по дну, L_{dp} – довжина кар'єру по поверхні (або навпаки – залежить від прийнятої схеми), B_p – ширина по поверхні, B_d – ширина по дну, H_k – глибина кар'єру, γ – кут укосу борту кар'єру.

$H_k = 600$ м, середній кут укосу для міцних порід при глибині >300 м: $\gamma \approx 45^\circ \rightarrow \operatorname{ctg} 45^\circ = 1$

Розрахунок збільшення габаритів:

$$\Delta L = 2 \times 600 \times 1 = 1200 \text{ м}$$

$$\Delta B = 2 \times 600 \times 1 = 1200 \text{ м}$$

Площа додаткового розширення:

$$\Delta S_1 \approx 1.2 \times 1.2 = 1.44 \text{ км}^2 = 144 \text{ га}$$

Сценарій 2 – комбінована схема (кар'єр до 400 м)

$$\Delta L = 2 \times 400 \times 1 = 800 \text{ м}$$

$$\Delta B = 2 \times 400 \times 1 = 800 \text{ м}$$

$$\Delta S_2 \approx 0.8 \times 0.8 = 0.64 \text{ км}^2 = 64 \text{ га}$$

Екологічний коефіцієнт економії площі буде мати наступний вигляд:

$$K_s = \frac{S_1 - S_2}{S_1}$$

$$K_s = \frac{144 - 64}{144} = 0.56$$

Тобто, зменшення площі порушених земель складає 56% в умовах 2 варіанту.

Розрахунок економії розкривних робіт залежить від об'єму розкриву, а саме:

$$V = S \times H_{cp}$$

де: H_{cp} – середня глибина розкриву, S – площа розкриву, V – об'єм розкриву.

Для спрощення беремо середню глибину для двох сценаріїв та розраховуємо об'єми розкриву (табл. 3.3.).

Екологічний коефіцієнт економії розкриву буде мати наступний вигляд:

Таблиця 3.3

Об'єми розкриття для двох сценаріїв

Сценарій 1:	Сценарій 2:
Глибина 600 м	Глибина 400 м
$V_1 = 144 \text{ га} \times 600 \text{ м} \approx 86.4 \text{ млн м}^3$	$V_2 = 64 \text{ га} \times 400 \text{ м} \approx 25.6 \text{ млн м}^3$

$$K_v = \frac{V_1 - V_2}{V_1}$$

$$K_s = \frac{86.4 - 25.6}{86.4} = 0.70$$

Тобто, економія розкриття складає 70% в сценарії 2 відносно сценарію 1.

Оцінка зниження впливу на гідрогеологічний режим.

Радіус депресійної лійки (R) приблизно пропорційний глибині (H), тобто:

$$R \sim \sqrt{H}$$

$$R_1 \sim \sqrt{600} = 24.5 \text{ м (сценарій 1)}$$

$$R_2 \sim \sqrt{400} = 20 \text{ м (сценарій 2)}$$

Тоді екологічний коефіцієнт економії радіусу депресійної лійки має вигляд:

$$K_R = \frac{R_1 - R_2}{R_1}$$

$$K_R = \frac{24.5 - 20}{24.5} = 0.18$$

За іншим сценарієм маємо зменшення радіуса впливу на 18–20%.

Формування інтегрального екологічного коефіцієнта економії Кесо.

У реальних системах оцінювання всі показники мають різну значимість. Наприклад, деградація ґрунту може мати менший вплив на екологічну стабільність, ніж кількість важких металів у водах. Або у водних екосистемах якість води може важити більше, ніж морфологічна стабільність схилів. Тому ваги (вагові коефіцієнти) дозволяють: відобразити експертну або нормативну значимість показника; інтегрувати різноманітні дані у єдину оцінку; уникнути ситуації, коли велике значення маловажливого показника «врівноважується» малим значенням важливішого показника [11].

Саме тому, припустимо введення вагових коефіцієнтів, які показують наскільки важливий кожен показник у загальній оцінці екологічного стану; як зміна одного показника впливає на інтегральний показник; що деякі показники можуть бути більш значущими (наприклад, забруднення води) порівняно з іншими (наприклад пилом). Наприклад:

1. площа порушення – 0.4
2. розкриття – 0.3

3. гідрогеологія – 0.2

4. викиди/пил – 0.1

Фактично, це стандартний елемент багатокритеріальної оцінки. Вагові коефіцієнти у формулі інтегрального показника були отримані методом парних порівнянь (МПП) на основі експертних оцінок фахівців у галузі гірничої екології. Це дозволяє врахувати різну значущість окремих компонентів екологічного стану у загальному інтегральному критерії. У гірничо-екологічних системах якість води та гідрогеологічний стан критично впливають на екосистему, тоді як деякі морфологічні параметри можуть бути менш визначальними. Тому застосування методів МПП або експертних оцінок є більш обґрунтованим [12].

$$K_{\text{есо}} = 0.4K_s + 0.3K_v + 0.2K_R + 0.1K_E$$

Приймаємо середнє зниження пилу 30%, тобто $K_E = 0.3$, тоді :

$$K_{\text{есо}} = 0.4 \times 0.56 + 0.3 \times 0.70 + 0.2 \times 0.18 + 0.1 \times 0.30 = 0.50$$

Екологічний коефіцієнт економії становить $K_{\text{есо}} = 0.50$. Отже, комбінована система зменшує сукупне екологічне навантаження приблизно на 50% порівняно з повністю кар'єрною схемою.

Наступний етап – це інтеграція в інтегральний критерій екологічної збалансованості. У роботі модель адаптована до умов гірничопромислових геосистем.

Базовий інтегральний критерій $I_{\text{ес}}$ з класу адитивних інтегральних індексів з нормуванням відносно порогових (критичних) значень має такий вигляд:

$$I_{\text{ес}} = \sum \omega_i \frac{X_i}{X_{\text{crit}}}$$

де: X_i – фактичне значення; X_{crit} – гранично допустиме або цільове значення; ω_i – це вага показника i , яка визначає ступінь впливу цього показника на інтегральний результат.

Нормування виконано методом min–max. Це стандартна форма побудови інтегральних показників в екологічній безпеці, сталому розвитку, техногенно-екологічному ризику, геоекологічній оцінці територій. Такий підхід широко використовується в екологічних індексах якості води (WQI), індексах техногенного навантаження, системах екологічного моніторингу. Пороговий підхід або використання X_{crit} дозволяє врахувати екологічні нормативи (ГДК, допустимі деформації тощо) та визначити межу переходу системи в нестійкий стан.

До критерію можуть додаватися такі показники:

1. Гідрогеологічний блок - коефіцієнт зміни рівня підземних вод, мінералізація.

2. Геоморфологічний блок - коефіцієнт техногенної трансформації рельєфу, індекс ерозійної небезпеки.

3. Ґрунтовий блок - коефіцієнт деградації ґрунтів, рівень важких металів.

4. Біотичний блок - індекс біорізноманіття, площа порушених екосистем.

Тобто, ця система оцінки інтегрує різні екологічні параметри.

Для двох сценаріїв $I_{ES(1)}$ та $I_{ES(2)}$ маємо наступні показники:

$$\begin{aligned} I_{ES(1)} &> 1 \\ I_{ES(2)} &\approx 0.5-0.7 \end{aligned}$$

де $I_{ES} < 0.7$ – екологічно допустимий рівень.

Висновки. Вперше для умов Гуляйпільського родовища розроблено та розраховано інтегральний критерій для оцінки екологічної збалансованості території, розроблено формалізовану модель оцінки екологічної ефективності комбінованої системи розробки.

Запропоновано екологічний коефіцієнт економії, що інтегрує площинні, об'ємні та гідрогеологічні параметри.

4. Доведено, що перехід на змішану систему дозволяє зменшити сукупне екологічне навантаження на 50%. Варто зауважити, що інтегральний критерій дозволив кількісно оцінити екологічну ефективність технологічних схем 1 і 2, засвідчивши, що перехід до змішаної системи розробки (другий сценарій) підвищує екологічну збалансованість території.

Література

1. Emekwisia, C.C., Ogunsiji, T.O., Bauna, F.K., Otsabomhe, G.O., Akinbamilowo, O.O., Olagunju, A.R., Akagu, E.E. Comparative Analysis of Environmental Impacts Associated with Surface and Underground Mining Operations. *South Asian Research Journal of Engineering and Technology*, 7(4), 2025. С. 121–125. URL: <https://doi.org/10.36346/sarjet.2025.v07i04.005>.
2. Stupnik M., Kalinichenko V., Kalinichenko O., Shepel O., Pochtarev A. Improvement of the transitional technology from open pit to underground mining of magnetite quartzite. *E3S Web of Conferences* 526, 2024 - 01026. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452601026>.
3. Амбер А. Інтегральна оцінка управління економіко-екологічною безпекою підприємств України. *Економічний простір*, № 204, 2025. - С. 17-23. URL: <https://doi.org/10.30838/EP.204.17-23>.
4. Сгоров І. Комплексні індикатори у соціально-економічних дослідженнях: переваги і недоліки. *Університетські наукові записки*, № 1-2 (85-86), 2022. - С. 195-205. URL: <https://doi.org/10.37491/UNZ.85-86.16>.
5. Кваско, А.В. Аналіз методів оцінки конкурентоспроможності підприємства. *Наукові записки /Української академії друкарства*, № 1(54), 2017. С. 111–118. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/23737>.
6. КМУ Розпорядження «Про схвалення Концепції створення загальнодержавної автоматизованої системи «Відкрити довкілля» від 7.11.2018 р. № 825-р. Київ. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/825-2018-%D1%80/en/ed20181107#Text>.
7. Директива Європейського Парламенту і Ради 2000/60/ЄС від 23.10.2000 р. «Про встановлення рамок заходів Співтовариства в галузі водної політики». Документ 994_962./Редакція від 20.11.2014/. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_962#Text.
8. Попова В.І. Екодіагностика природно-господарської організації України: агроландшафтний аспект. *Економіка і прогнозування*. № 3, 2012. - С. 92-101.9. Hsu, A., L.A. Johnson, and A. Lloyd. Measuring Progress: *A Practical Guide from the Developers of the Environmental Performance Index (EPI)*. New Haven: Yale Center for Environmental Law & Policy, 2013. – 80 p. URL: http://www.epi.yale.edu/sites/default/files/downloads/YCELP_Measuring_Progress_Manual.pdf.
9. Emekwisia, Chukwudubem C., Ogunsiji, Taiwo O., Bauna, Faith K., Otsabomhe, Godfrey O., Akinbamilowo, Oladimeji O., Olagunju, Adewale R., Akagu, Emmanuel E. Comparative Analysis of Environmental Impacts Associated with Surface and Underground Mining Operations. *South Asian Res J Eng Tech*, 7(4), 2025. - 121-125 c. <https://doi.org/10.36346/sarjet.2025.v07i04.005>.
10. Alina Kabata-Pendias. *Trace Elements in Soils and Plants*, Third Edition 3rd Edition. CRC Press, 2000. - 331 p. URL: <https://dl.icdst.org/pdfs/files3/284d873749e377558208bca765468ffd.pdf>.
11. Atul Singh, Siddhartha Agarwal, Aniket Prabhat. A multi-criteria decision framework to evaluate sustainable alternatives for repurposing of abandoned or closed surface coal mines. *Frontiers in Earth Science*, V. 12, 2024. – 14 p.

Дата першого надходження статті до видання: 30.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

ТОКСИЧНИЙ ВПЛИВ МІКРОПЛАСТИКУ НА ВОДНІ ЕКОСИСТЕМИ ТА ЛЮДИНУ

Клід В.В.¹, Харченко Ю.В.², Демчина Р.О.³¹Карпатський національний університет імені Василя Стефаника
вул. Шевченка, 57, 76000, м. Івано-Франківськ²Сумський державний педагогічний університет імені А.С. Макаренка
вул. Роменська, 87, 40000, м. Суми³Національний лісотехнічний університет України
вул. Генерала Чупринки, 103, 79057, м. Львів
viktor.klid@pnu.edu.ua; yuvlakhar@gmail.com; demschyna@nltu.edu.ua

Антропогенна діяльність призводить до зростання концентрацій токсичних речовин у поверхневих водоймах, формуючи ризики для біоти, екосистеми в цілому та здоров'я людини. Особливу загрозу на сьогодні створює глобальне забруднення мікропластиком, що має прямий та вторинний вплив на живі організми та довкілля. Дослідження присвячене розширеному аналізу токсичного впливу мікропластику та пошуку шляхів превентивної підтримки стійкості екосистем до його безпосередньої дії. Розглянуто специфіку реагування біосистеми на забруднювач, ідентифіковані основні джерела забруднення. У статті запропоновано оптимальні практичні заходи для зменшення негативного впливу пластику на стан природних водойм та здоров'я населення, покращення загальної екологічної ситуації. При цьому було проаналізовано успішні практики боротьби з пластиковим забрудненням у розвинених країнах глобальної спільноти: доведено ефективність міжнародних ініціатив та програм боротьби з пластиковим забрудненням, партнерства державних природоохоронних інституцій з приватним сектором та громадськістю, просування альтернатив пластику та підвищення відповідальності виробників. Зважаючи на широту спектру шкідливого впливу мікропластику на довкілля, стає очевидною необхідність формування комплексних стратегій екологічної стійкості для інтеграції в реалії соціально-економічного середовища: забезпечення постійного контролю рівня забруднення компонентів навколишнього середовища; способів очистки гідросфери в цілому та, зокрема, питної води; розробки і впровадження нових видів біорозкладних альтернатив традиційному пластику. У дослідженні обґрунтована важливість своєчасної ідентифікації джерел забруднення, а також включення дослідження мікропластикового забруднення до програм моніторингу поверхневих природних вод за різними фракціями пластику. **Ключові слова:** забруднення, довкілля, мікропластик, поверхневі води, стічні води, екосистема, біота, антропогенне навантаження, біоіндикація, забруднення навколишнього природного середовища.

Toxic effects of microplastics on aquatic ecosystems and humans. Klid V., Kharchenko Y., Demchyna R.

Water and environmental problems are reflected in the degradation of water and land resources, deterioration of population health indicators, destructive processes in ecosystems, and reduction of biodiversity. A particular threat today is global microplastic pollution, which has a direct and secondary impact on living organisms and the environment. The study is devoted to an expanded analysis of the toxic impact of microplastics and the search for ways to preventively support the resilience of ecosystems to its direct action. The successful practices for combating plastic pollution in developed countries of the global community were analyzed: the effectiveness of international initiatives and programs to combat plastic pollution, partnerships between state environmental institutions with the private sector and the public, the promotion of alternatives to plastic, and increased responsibility of producers are proven. The study substantiates the importance of timely identification of pollution sources, as well as the inclusion of microplastic pollution studies in surface natural water monitoring programs for various plastic fractions. Micron- and nano-sized plastic particles are rapidly and widely distributed in the aquatic environment through food webs and aggregation processes, destructively affecting entire ecosystems and creating new, often unidentified threats to human health. The article conducts a comparative analysis of trends in minimizing the impact of plastic in Germany, China, and the USA and proposes the author's vision of a comprehensive strategy for managing plastic waste in Ukraine to achieve key environmental and social goals of sustainable development. The concept proposed in the study focuses on achieving key environmental goals and involves reducing the production and use of single-use plastic products, integrating and supporting zero waste systems, and defining and adopting realistic, achievable pollution reduction targets. **Key words:** pollution, environment, microplastics, surface water, wastewater, ecosystem, biota, anthropogenic load, bioindication, environmental pollution.

Постановка проблеми. У природні відкриті водотоки та водойми без належного очищення скидається великий обсяг забруднених стічних вод, що містять у своєму складі сполуки та елементи, шкідливі для водного середовища та екологічної обстановки в цілому. Водно-екологічні проблеми знаходять своє відображення у деградації водних та

земельних ресурсів, погіршенні показників здоров'я населення, деструктивних процесів в екосистемах, зменшенні біорізноманіття. Одним із найбільш небезпечних забрудників, що важко піддається ідентифікації, є мікропластик.

Глобальні показники виробництва пластику зросли вдвічі за 2005-2025 рр., маючи тенденцію до



подальшого збільшення. При цьому лише близько 9% пластику ефективно переробляється: решта 12% спалюється, 79% розміщується на полігонах і в навколишньому середовищі [1]. Кожного року у водні об'єкти надходить близько 5-13 млн. т пластикових відходів. Як свідчать статистичні дані, сформовані організацією по збереженню морського середовища Surfers Against Sewage, така тенденція має спричинити до 2050 року перевищення загальної маси пластику у Світовому океані над їх масою.[2].

Актуальність дослідження. Мікропластик потрапляє у природне водне середовище через стічні води, поверхнево активні речовини від побутової хімії, розкладання великого сміття, а також атмосферні опади. Зазначене робить його присутність повсюдною, будучи глобальним забрудником водних ресурсів, який адсорбує токсини та спричиняє біоаккумуляцію у водних організмах, для людини мікропластик становить особливу небезпеку, викликаючи гормональні порушення, хронічні запалення, підвищуючи ризики виникнення онкологічних та серцево-судинних захворювань, ураження нервової системи. Це зумовлює необхідність активного дослідження специфіки впливу мікропластику на водні організми та людину в сучасних умовах функціонування екосистем, у тому числі з використанням методів біоіндикації.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Негативні наслідки скидів забруднюючих речовин у природне водне середовище вивчаються у роботах сучасних дослідників Т. Волкер, Л. Фекет (T. Walker, L. Fequet) [3], М. Башман (M. Bachmann) та ін. [4]. Вчені приділяють особливу увагу токсичним та канцерогенним властивостям окремих складових стічних вод від промисловості та комунального господарства та приходять до переконання, що багато деструктивних змін у водних екосистемах, що важко піддаються регенерації, спровоковані саме масштабними скидами токсичних відходів пластику. Висновки вчених доповнює група дослідників на чолі Ф. Хак та К. Фан (F. Naque, C. Fan) [5], а також Н. Евойд (N. Evode) [6], котрі переконують у особливій актуальності впливу на природні водні об'єкти нових маловивчених забрудників, які фактично не піддаються очищенню навіть при задовільному стані систем повного очищення стічних вод. У пошуку способів оптимізації ситуації та нівелювання негативних наслідків вчені приходять до висновків, що модернізація діючих очисних споруд, з пріоритетом екологічності, у поєднанні з ефективним моніторингом параметрів забруднення навколишнього середовища є оптимальним екосистемним підходом до збереження довкілля та здоров'я населення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У публікаціях Е. Джонс, М. Вандерс (E. Jones E., M. Wanders) [7] було запропоновано рішення для покращення процесу поводження з пластиковими відходами, шляхом використання різних стратегій та

інструментів – організаційних, технічних, управлінських. Л. Хоу та ін. (L. Hou) [8], М. ван Вліет (M. van Vliet) [9] виділили ключові перспективи вдосконалення процесу в найближчому майбутньому: скорочення споживання пластику, встановлення жорстких вимог до переробки та утилізації відходів, інтеграція загальної стратегії переходу до циклічної економіки та відповідального виробництва.

Т. Нільсен з колегами (T. Nielsen) [10] провели загальне якісне дослідження, в ході якого були розглянуті основні інструменти зеленого фінансування екологічно стійких проектів. Зелені облигації, зелені кредити, державні субсидії, на думку авторів, можуть використовуватись для фінансування проектів, спрямованих на зниження негативного впливу на навколишнє середовище, зокрема – для нейтралізації шкідливого впливу пластику на динаміку екосистем.

Окремі аспекти досліджуваної проблеми розглядаються в публікаціях М. М. Маклед та ін. (M. MacLeod) [11], А. Кольманс та ін. (A. Koelmans) [12], де науковці позиціонують мікропластик основною загрозою для поглинання вуглецю в океані, що впливає на кліматичну динаміку.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Водночас, окремі аспекти інтеграції сучасних підходів до поводження з пластиковими відходами залишаються малодослідженими. Спостерігається дефіцит практичних досліджень у даному полі, які б дозволили розробити конкретні інструменти формування дієвих програм ефективної боротьби із забрудненням.

Новизна. У дослідженні запропоновано новий підхід до усвідомлення впливу мікропластику та запропоновано авторське бачення комплексної концепції збереження екологічної стабільності через врегулювання поводження з пластиковими забруднювачами, що базуються на міжнародному досвіді.

Методологічне або загальнонаукове значення. Метою дослідження є розширений аналіз впливу мікропластику на гідросферу та людину, вивчення існуючих рішень щодо мінімізації такого впливу. У статті проведено порівняльний аналіз тенденцій мінімізації впливу пластику у Німеччині, Китаї, США та запропоновано авторське бачення комплексної стратегії поводження з пластиковими відходами в Україні для досягнення ключових екологічних та соціальних цілей сталого розвитку.

Виклад основного матеріалу. Частишки мікропластику потрапляють у поверхневі води внаслідок безпосереднього потрапляння від антропогенної діяльності, або ж через деструкцію більших пластикових відходів, що надходять у водні об'єкти з суші. Особливі розміри мікропластику (0,1–5 мм) дозволяють йому потрапити в саму основу морської харчової мережі, впливати на стан зоопланктону, пригнічують фотосинтез та спричиняють окислювальний стрес. Він є токсичним для гідробіонтів, слугуючи

трансфером хімічних сполук (фталати, бісфенол А), які деструктивно впливають на ендокринну систему та накопичуються в харчових ланцюгах. При цьому варто зауважити, що нанопластик (розміром менше 0,1 мкм) вбачається особливо небезпечним в контексті токсичного ефекту при підвищеній проникній здатності, що потенційно може порушувати фізіологічні процеси [13].

Потрапляючи в організм людини, мікропластик впливає комплексно, адже з шлунково-кишкового тракту потрапляє в кров, накопичується у нирках і печінці, чинить запальний та канцерогенний вплив, може навіть потенційно призводити до мутацій клітин і виникнення новоутворень. Важливою особливістю мікропластику є його адсорбуючі властивості, що підсилює його токсичну дію за рахунок раніше увібраних шкідливих речовин. Так, ученими на сьогодні експериментально доведено зв'язок між впливом пластику і захворюваннями нервової, травної системи, генетичними мутаціями, розвитком лейкемії, зниженням репродуктивної функції [7].

Необхідно також відзначити вторинні наслідки токсичного впливу мікропластику, зокрема, що виникають як результат поглинання частинок пластику водною біотою, внаслідок чого залишкові мономери – компоненти з'єднань пластику можуть вилугуватися. Також потенційними вторинними наслідками є абсорбція стійких органічних забруднювачів поверхнею пластику, що підсилює його токсичну дію на живі організми [4], або ж виділення токсичних проміжних продуктів при частковій деградації пластику.

Глобальна спільнота просуває ряд екологічних ініціатив у даному напрямку. Зокрема, розмір ринку переробленого пластику в Німеччині у 2024 році оцінювався у 5,62 млн. доларів США. Очікується, що ринок переробленого пластику в Німеччині до 2033 р. перевищить 7,98 мільйона доларів США, зростаючи з середньорічним темпом зростання 3,57% з 2023 по 2033 [14]. Попит на пакувальні матеріали, особливо на пластик, зростає разом із зростанням онлайн-комерції, а тому в Німеччині з 2021 року запроваджено заборону на низку одноразових пластикових виробів відповідно до директиви Європейського Союзу. Також, з 2021 року виробники несуть відповідальність за збір та утилізацію своєї продукції та упаковки, що сприяє збільшенню частки вторинних матеріалів та стимулює використання упаковки, що переробляється.

Як результат таких заходів, ступінь переробки упаковки в Німеччині перевищує 70%, а відходів пластикової упаковки – близько 50%, що є одним із найкращих показників у світі. Процес переробки пластику в Німеччині передбачає роздільне збирання відходів та їх додаткове сортування за типами пластику на заводах, механічну обробку, грануляцію – подрібнений пластик плавиться та переробляється в гранули, які є сировиною для виробництва нових виробів (упаковки, контейнерів, пляшок та ін.).

У той же час, Китай ввів обмеження на імпорт відходів через екологічні проблеми та зниження якості сировини, що переробляється. Це змусило розвинені країни шукати інші шляхи утилізації відходів, а Китай – зосередитись на власних проблемах. У Китаї використовуються різні види переробки пластику, розробляються нові, біорозкладні матеріали, і вводяться заборони на одноразовий пластик [15].

Усі наслідки забруднення водойм стічними водами завдають величезної шкоди природним екосистемам, негативно впливаючи на їх різні складові. Загалом можна стверджувати про економічні (наприклад, втрати продуктивності водойм, витрати на регенерацію), соціальні (зокрема, деградація ландшафтів) та екологічні (наприклад, руйнування унікальних екосистем, зникнення видового розмаїття) векторів негативних наслідків впливу мікропластику на природні водойми.

У наступні роки очікувати зниження кількості забруднюючих речовин з вмістом мікропластику, що надходять у природні водойми України, не доводиться. Така ситуація актуалізує необхідність ефективного моніторингу, а також моделювання та прогнозування стану природних поверхневих вод за умов посилення впливу антропогенної діяльності. З метою оптимізації ситуації водно-екологічного спрямування є оптимальними та реальними до впровадження наступні заходи:

- впровадження та оптимізація системи моніторингу стану водних ресурсів; посилення заходів відповідальності за забруднення природних водойм стічними водами;
- оптимізація законодавчої бази у галузі водокористування;
- пріоритетність приведення у належний стан та покращення систем очищення стічних вод у процесі планування та реалізації програм регіонального розвитку;
- розробка та впровадження сучасних систем очищення стічних вод з метою обмеження, а в майбутньому – заборони на безпосереднє скидання стічних вод у природні водойми;
- удосконалення системи управління водними ресурсами, їх розподілом та раціональним використанням.

Для «зеленого» розвитку та екологізації виробничих процесів необхідним є впровадження енергоефективних, екологічно орієнтованих інноваційних технологій, за допомогою яких стає можливим максимальний контроль за процесами утворення шкідливих речовин та зменшення кількісних показників їх у стічних водах [16]. Базові інструменти впровадження стратегії – скорочення виробництва та використання одноразових пластикових виробів – мають бути закріплені на законодавчому рівні. При цьому необхідно забезпечити заміну одноразових пластикових виробів на багаторазові, а не інші одноразові матеріали, адже досягнення кількісних цілей ско-

рочення забруднення має супроводжуватися цілями циркулярного використання.

Інтеграція та підтримка систем zero waste («нуль відходів») передбачає безвідходні бізнес-моделі та алгоритми циклічного використання, заборону спалювання пластикових відходів, впровадження практик запобігання утворенню відходів, відкриття центрів повторного використання, використання ефективних економічних стимулів для застосування бізнесом систем повторного використання, роздільний збір та переробка відходів. Zero Waste щодо пластику в Україні має розглядатися як стратегія поетапної мінімізації утворення пластикових відходів шляхом відповідального споживання, багаторазового використання та переробки, а також відмови від одноразового пластику (пластикових пакетів та посуду, вода у пластикових пляшках, пластикові трубочки та упаковка, одноразові пакети) на користь альтернативних багаторазових рішень.

Ефективний моніторинг дозволить вчасно ідентифікувати «вузькі місця» та превентивно попереджати проблемні ситуації. Тому вбачається за необхідне формувати комплексний екосистемний підхід до боротьби з забрудненням мікропластиком, що дозволить максимально ефективно та швидко досягати цілей сталого розвитку.

Перспективи використання результатів дослідження. Мікронні та нанорозмірні частинки пластику швидко і широко поширюються у водному середовищі через харчові мережі та процеси агрегації, деструктивно впливаючи на цілі екосистеми та створюючи нові, часто неідентифіковані загрози для здоров'я людини. Запропонована у дослідженні концепція зосереджена на досягненні ключових екологічних цілей і передбачає скорочення виробництва та використання одноразових пластикових виробів, інтеграцію та підтримку систем zero waste, визначення та прийняття реальних досяжних цілей щодо скорочення забруднення.

Література

1. Plastic Atlas: Facts and figures about the world of synthetic polymers, 2019. https://www.boell.de/sites/default/files/2020-01/Plastic%20Atlas%202019%202nd%20Edition.pdf?dimension1=ds_plastikatlas#page=13 (дата звернення: 15.01.2026)
2. Surfers Against Sewage, 2024. <https://www.sas.org.uk/> (дата звернення: 15.01.2026)
3. Walker T. R., Fequet L. Current trends of unsustainable plastic production and micro (nano) plastic pollution. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2023. Vol. 160. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.116984> (дата звернення: 17.01.2026)
4. Bachmann M., Zibunas C., Hartmann J., Tulus V., Suh S., Guillén-Gosálbez G., Bardow A. Towards circular plastics within planetary boundaries. *Nature Sustainability*. 2023. Vol. 6(5). Pp. 599-610. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-01054-9> (дата звернення: 20.01.2026)
5. Haque F., Fan C. Fate of microplastics under the influence of climate change. *Iscience*. 2023. Vol. 26(9). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.107649> (дата звернення: 21.01.2026)
6. Evode N., Qamar S. A., Bilal M., Barceló D., Iqbal H. M. Plastic waste and its management strategies for environmental sustainability. *Case studies in chemical and environmental engineering*. 2021. Vol. 4. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2021.100142> (дата звернення: 21.01.2026)
7. Jones E., Wanders M. Current wastewater treatment targets are insufficient to protect surface water quality. *Commun Earth Environ*. 2022. № 3(221). <https://www.nature.com/articles/s43247-022-00554-y#citeas> (дата звернення: 22.01.2026)
8. Hou L., Zhou Z., Wang R., Li J., Dong F., Liu J. Research on the Non-Point Source Pollution Characteristics of Important Drinking Water Sources. *Water*. 2022. № 14(211). <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/2/211> (дата звернення: 25.01.2026)
9. T H van Vliet M., Jones E., Florke M. Global water scarcity including surface water quality and expansions of clean water technologies. *Environ Res Letters*. 2021. Vol. 16. № 2. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abbfc3> (дата звернення: 22.01.2026)
10. Nielsen T. D., Hasselbalch J., Holmberg K., Strippel J. Politics and the plastic crisis: A review throughout the plastic life cycle. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*. 2020. Vol. 9(1). <https://doi.org/10.1002/wene.360> (дата звернення: 20.01.2026)
11. MacLeod M., Arp H. P. H., Tekman M. B., Jahnke A. The global threat from plastic pollution. *Science*. 2021. Vol. 373(6550). Pp. 61-65. DOI: 10.1126/science.abg5433 (дата звернення: 19.01.2026)
12. Koelmans A. A., Nor N. H. M., Hermesen E., Kooi M., Mintenig S. M., De France J. Microplastics in freshwaters and drinking water : Critical review and assessment of data quality. *Water Research*. 2019. № 155. Pp. 410-422. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.02.054> (дата звернення: 24.01.2026)
13. Kyriakopoulos G. L., Zamparas M. G., Kapsalis V. C. Investigating the human impacts and the environmental consequences of microplastics disposal into water resources. *Sustainability*. 2022. T. 14. № 2. P. 828. <https://doi.org/10.3390/su14020828> (дата звернення: 19.01.2026)
14. Europe Recycled Plastics Market. Grand View Research Reports, 2025. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/europe-recycled-plastics-market-report> (дата звернення: 16.01.2026)
15. China Recycled Plastics Market Size & Outlook. Grand View Research Reports, 2025. <https://www.grandviewresearch.com/horizon/outlook/recycled-plastics-market/china> (дата звернення: 22.01.2026)
16. Klymenko K., Petrukha N., Petrukha S. "Green" Marshall Plan For Ukraine : Financial, Economic and Regulatory Context. *RFI Scientific papers*. 2024. № 1 (106). Pp. 20-49. <https://doi.org/10.33763/npndfi2024.01.020> (дата звернення: 22.01.2026)

Дата першого надходження статті до видання: 02.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

ДОСЛІДЖЕННЯ БІОРІЗНОМАНІТТЯ ФІТОЦЕНОЗУ ТА БІОКРАСТОВИХ МІКРООРГАНІЗМІВ ПРОМИСЛОВОГО ВІДВАЛУ «ПЕТРОВСЬКИЙ» ПРАТ «ЦГЗК» М. КРИВИЙ РІГ

Ковров О.С., Кулікова Д.В., Баланюк А.Д., Іщенко Ю.Д., Богун А.С.
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
пр. Д. Яворницького, 19, 49005, м. Дніпро
kovrov.o.s@nmu.one, kulikova.d.v@nmu.one, Balaniuk.An.D@nmu.one,
Ishchenko.Y.D@nmu.one, Bohun.A.S@nmu.one

Промислові відвали Кривбасу є осередками тривалого техногенного навантаження, що проявляється у деградації техноземів, ерозії та пилоутворенні, а також у спрощенні біотичних угруповань. Природна сукцесія рослинного покриву на відвалах пустих порід є поступовим, проте надзвичайно важливим процесом екологічного самовідновлення техногенно порушеної екосистеми. Метою роботи є комплексна оцінка біорізноманіття фітоценозу та біокрасту залізрудного відвалу «Петровський» ПрАТ «ЦГЗК» (м. Кривий Ріг) як основи для науково обґрунтованих рішень щодо рекультивациі та біоремедіації. Дослідження виконано на верхньому та нижньому ярусах відвалу з урахуванням мікробіотопної мозаїчності. Проведено геоботанічні обстеження видового складу деревно-чагарникової й трав'янистої рослинності та відбір зразків техноземів із 12 точок для аналізу біокрастового субстрату. Мікроскопічні спостереження (400×) виявили змішану фототрофно-гетеротрофну спільноту біокрасту, де домінують нитчасті ціанобактерії порядку Oscillatoriales (морфотипи *Phormidium* та *Leptolyngbya*), присутні кокоїдні ціанобактерії (*Gloeocapsa*, *Chroococcus*, *Aphanocapsa*), колоніальні та поодинокі зелені мікроводорості (*Chlorococcum*, *Gloeocystis*), а також численні гетеротрофні паличкоподібні бактерії роду *Bacillus*. Рослинний покрив відвалу представлений піонерними та рудеральними видами з ознаками активних сукцесійних процесів; верхній ярус характеризується кращою адаптацією й потенціалом природного самовідновлення, тоді як нижній ярус залишається більш ризикованим щодо ерозії та пиління. Отримані результати підтверджують синергійну роль фітоценозу та біокрасту у стабілізації техногенного субстрату, акумуляції органічної речовини та формуванні передумов ґрунтоутворення. Практичне значення роботи полягає у можливості використання індикаторних компонентів рослинності та біокрасту для екологічного моніторингу, картування ділянок пріоритетної стабілізації та підбору природоорієнтованих заходів рекультивациі відвалів Кривбасу. **Ключові слова:** промислові відвали, фітоценоз, біокраст, біорізноманіття

Study of phytocoenosis and biocrust microorganisms biodiversity of the “Petrovskiy” industrial waste dump of PJSC “CGOK”, Kryvyi Rih. Kovrov O., Kulikova D., Balanyuk A., Ishchenko Yu., Bohun A.

Industrial waste dumps of the Kryvyi Rih Basin are hotspots of long-term technogenic pressure manifested by technosol degradation, erosion, dust emissions and simplified biotic communities. The natural succession of vegetation cover on waste rock dumps is a gradual and exceptionally important process of ecological self-restoration in a technogenically disturbed ecosystem. This study provides an integrated assessment of the biodiversity of the phytocoenosis and biological soil crust on the Petrovskiy waste dump of PJSC “CGOK” (Kryvyi Rih, Ukraine) as a basis for reclamation and bioremediation. Surveys were conducted on the upper and lower terraces with account of microbiotope mosaicity. We carried out geobotanical inventories of vegetation and collected technosol samples from 12 points to analyse biocrust substrates. Light microscopy (400×) revealed a mixed phototrophic–heterotrophic biocrust community dominated by filamentous cyanobacteria of Oscillatoriales (*Phormidium* and *Leptolyngbya* morphotypes), with coccoid cyanobacteria of *Gloeocapsa*, *Chroococcus* and *Aphanocapsa* types, green microalgae of *Chlorococcum* and *Gloeocystis* types, and *Bacillus* bacteria. Vegetation cover is formed by pioneer and ruderal species indicating active succession; the upper terrace shows better adaptation and higher self-recovery potential, whereas the lower terrace remains more vulnerable to erosion and dusting. The results confirm the synergistic role of phytocoenosis and biocrust in stabilising technogenic substrates, accumulating organic matter, improving the microstructure of the surface layer and initiating soil-forming processes. The novelty lies in the integrated analysis of vegetation and biocrust microorganisms within one technogenic site, with identification of indicators of early succession stages. The practical value of the study is related to ecological monitoring, mapping of priority stabilisation areas and selection of nature-based reclamation measures for Kryvbas waste dumps. **Key words:** industrial waste dumps, phytocoenosis, biocrust, biodiversity

Постановка проблеми. Промислові відвали є одним із найбільш серйозних екологічних викликів для промислових регіонів, особливо для таких, як Кривий Ріг. Це місто є одним із найбільших центрів видобутку та переробки залізної руди в Україні, що призводить до накопичення значної кількості техногенних відходів. Відвали, що утворюються внаслідок

гірничодобувної діяльності, займають великі території, змінюють ландшафт, негативно впливають на ґрунти, водні ресурси та атмосферне повітря. Вони можуть містити важкі метали, сульфідів та інші токсичні речовини, які спричиняють довготривалий негативний вплив на екосистему регіону. Тому комплексні дослідження біорізноманіття піонерних



рослинних угруповань та мікробіоти техногенних ґрунтів залізорудних відвалів є важливим етапом їх екологічної оцінки для обґрунтування ефективних технологій відновлення довкілля.

Актуальність дослідження. Місто Кривий Ріг є одним із найбільших промислових центрів України, де значні площі територій зайняті підприємствами гірничо-металургійного комплексу, машинобудування, будіндустрії та інших галузей. Загальна площа промислових територій у межах міста становить 16 216,47 га, а ще 15 282,0 га розташовані за його межами, проте безпосередньо межують із міськими промисловими зонами. Внаслідок масштабного видобутку корисних копалин відкритим і підземним методами утворюються численні промислові відвали, які займають великі площі та суттєво впливають на екологічний стан регіону [1].

Відвал розкритих порід «Петровський» ПрАТ «ЦГЗК» м. Кривий Ріг був сформований у 1959 році (рис. 1). Від початку він слугував місцем накопичення пустих порід, вивезених із залізорудного кар'єру. За десятиліття експлуатації цей техногенний об'єкт набув вражаючих масштабів: його висота сягає близько 45 метрів, довжина – понад 400 метрів, а загальна площа – близько 7 гектарів. Наразі Петровський відвал чинить значний вплив на навколишнє середовище: через процеси вивітрювання порід, викиди пилу та зменшення біорізноманіття. Поверхня відвалу здебільшого позбавлена стабільного рослинного покриву, що сприяє ерозії та підвищеному пилоутворенню.

Екологічною проблемою Петровського відвалу є те, що відходи, які розміщені в межах цієї ділянки, містять значний відсоток дрібної фракції, яка потенційно стає джерелом утворення пилу. На деяких поверхнях під впливом екзогенних чинників формуються кори вивітрювання, в межах яких породи руйнуються з утворенням дрібних часток, що стають додатковим джерелом пилу. Під дією вітру пилові частки переносяться (у вигляді пилових хмар) на

відстані до 3-5 км та накопичуються на поверхні рельєфу [2].

Зв'язок авторського доробку з важливими науковими та практичними завданнями. Авторський доробок, представлений у статті безпосередньо пов'язаний із пріоритетними науковими та практичними завданнями сучасної екології, зокрема відновленням техногенно порушених територій та забезпеченням екологічної безпеки промислових регіонів. Дослідження спрямоване на розуміння механізмів первинної сукцесії та формування біологічних угруповань у екстремальних умовах відвальних субстратів, що є фундаментально важливим для розвитку теорії сукцесій, екології стресових екосистем та функціонування біологічних ґрунтових кірок (біокрастів) як ключового компонента наземних екосистем.

З наукової точки зору стаття вирішує завдання інтегрованої оцінки біорізноманіття на рівні фітоценозу та біокрасту, що дозволяє повніше описати структуру та динаміку техногенних екосистем. Поєднання даних про рослинне різноманіття й організми біокрасту дає змогу встановити взаємозв'язки між стабілізацією субстрату, акумуляцією органічної речовини, розвитком мікробіоти та заселенням території рослинами-піонерами. Такий підхід підтримує актуальний міжнародний тренд до мультикомпонентних досліджень біорізноманіття та екосистемних функцій у відновлюваних ландшафтах і створює базу для порівняння техногенних ділянок різного типу та стадії сукцесії.

Практична значущість доробку авторів стосовно вивчення фітоценозу та біокрастових угруповань відвалу полягає в тому, що отримані результати формують науково обґрунтовану основу для рекультивациі та біоремедіації відвалу «Петровський» і подібних об'єктів Кривбасу. Визначення видового складу, домінант та індикаторних груп фітоценозу, а також характеристика біокрасту як природного “інженера” поверхні дозволяють: (1) обирати ефективні види-колонізатори та формувати стійкі рослинні



Рис. 1. Промисловий відвал Петровський

угруповання; (2) планувати протиерозійні заходи й мінімізувати пиління, що має прямий вплив на якість повітря у прилеглих населених пунктах; (3) оцінювати екосистемні послуги відновлених ділянок (стабілізація ґрунту, акумуляція вуглецю, регуляція водного режиму) та прогнозувати екологічні ризики для умов Криворізького промислового району.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Залізородні відвали Кривбасу є типовими техногенними ландшафтами, у яких одночасно розгортаються процеси початкового ґрунтоутворення, геохімічної міграції елементів і формування рослинного покриву, що визначає як екологічні ризики, так і можливості керованого відновлення. Дослідження ґрунтово-геохімічного блоку показують, що техноземи на відвалах відзначаються високою просторовою неоднорідністю властивостей і вмісту елементів, а їхні параметри зумовлюються мінералогією порід, гранулометриєю, карбонатністю, режимом зволоження та ерозійними процесами [3, 4]. У таких умовах фіксуються контрасти забезпеченості макроелементами та підвищені концентрації окремих важких металів, що формують селективний тиск на біоту й потребують системного моніторингу [5].

Фітоіндикаційні та екофізіологічні підходи доповнюють ґрунтові дослідження, демонструючи, що деревні рослини відвалів відображають геохімічний стан субстрату через профілі накопичення макро- та мікроелементів у листках і через зміни вторинного метаболізму, зокрема фенольних сполук, як маркерів стресу та адаптації (Bielyk et al., 2020; Bielyk et al., 2022). Це обґрунтовує використання деревних видів як інструменту біомоніторингу та як компонента фітомеліораційних схем, орієнтованих на стабілізацію субстрату й зниження пиління [6, 7]. Паралельно флористичні та ценотичні дослідження на модельних відвалах Криворіжжя описують закономірності первинного заселення та сукцесій (сингенезу) й показують, що траєкторії розвитку рослинності залежать від мікрорельєфу, властивостей субстрату та джерел діаспор, формуючи специфічну структуру фітоценозів із помітною участю стійких і синантропних видів [8, 9]. На прикладі Петровського відвалу деталізовано таксономічний склад деревно-чагарникових угруповань і їхню синантропну характеристику, що є важливим для оцінки потенціалу самовідновлення та ризиків небажаних сукцесій без управління [10, 11].

Прикладні роботи з рекультивації підкреслюють ефективність переходу від «разового озеленення» до біотехнологічного підходу, а саме формування стійких рослинних угруповань із урахуванням підготовки субстрату, протиерозійних заходів і довгострокового моніторингу [12]. Узагальнююча рамка техногенних ландшафтних систем Кривбасу розглядає відвали як елементи ширшої соціо-еколого-економічної системи з власними потоками речовини й функціями, що важливо для інтеграції рекультивації у стратегії

регіонального розвитку [13]. Загалом корпус публікацій демонструє перехід до інтегрованої моделі «ґрунт-геохімія-рослинність-управління», у якій фітоіндикація та сукцесійний аналіз безпосередньо підтримують проєктування рекультиваційних втручань. Перспективними напрямками залишаються довгострокові серії спостережень, кількісне моделювання міграції металів і солей у профілі, урахування ролі мікробіоти біокрастів у стабілізації субстратів, а також порівняльна оцінка «пакетів» рекультивації для різних типів відвалів Кривбасу.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.

Попри значну кількість робіт, присвячених рекультивації техногенно порушених земель Кривбасу, недостатньо дослідженим залишається комплексний зв'язок між біорізноманіттям фітоценозу та біокрасту саме на промислових відвалах залізородного походження. Більшість попередніх досліджень зосереджувались або на рослинному покриві (видовий склад, домінанти, стадії сукцесії), або окремо на мікробіоті ґрунтових біокірок. Невирішеною частиною проблеми залишається питання: які саме елементи біокрасту формують “пусковий механізм” стабілізації субстрату на конкретному відвалі, як змінюється їхня структура на мікробіотопах різної експозиції та субстратного складу, і як це відображається на швидкості й траєкторії заселення рослинами-піонерами.

Окремою прогалиною є відсутність достатньо деталізованих даних про просторову мозаїчність біокрасту й фітоценозів на відвалі «Петровський» та про їхню роль у формуванні екосистемних функцій, критичних для зменшення екологічних ризиків (пиління, ерозія, деградація мікроструктури поверхневого шару).

Новизна. Новизна дослідження полягає у комплексному, синхронному аналізі біорізноманіття фітоценозу та біокрасту промислового відвалу «Петровський» із виявленням їхніх взаємозв'язків на різних мікробіотопах техногенного субстрату. Вперше для цього об'єкта визначено індикаторні компоненти біокрасту та рослинного покриву, що відображають стадії первинної сукцесії й можуть бути використані для науково обґрунтованого моніторингу та вибору ефективних підходів до рекультивації/біоре mediaції.

Методологічне та загальнонаукове значення.

Методологічне значення дослідження полягає у запропонованому інтегрованому підході до оцінювання постмайнінгових екосистем, який поєднує аналіз структури фітоценозу та біокрасту з урахуванням мікробіотопної мозаїчності техногенного субстрату. Отримані результати розширюють уявлення про механізми первинної сукцесії й ґрунтоутворення на промислових відвалах та створюють основу для уніфікованих критеріїв екологічного моніторингу й прогнозування ефективності рекультивації.

Дослідження біорізноманіття фітоценозу відвалу. Біорізноманіттю Петровського відвалу присвячено низку наукових робіт, представлених вище, в яких досліджувались таксономічний склад та синантропна характеристика деревно-чагарникових угруповань. Виявлено, що на відвалі активно проходять сукцесійні процеси, які сприяють поступовому відновленню природного рослинного покриву. Це свідчить про можливість рекультивації та відновлення екологічної рівноваги на таких територіях.

Аналіз показав, що антропогенні фактори, такі як діяльність людини, мають значний вплив на формування та розвиток рослинного покриву на відвалі. Незважаючи на це, деякі види рослин демонструють високу адаптивність до змін середовища.

В межах нижнього ярусу Петровського відвалу можна помітити насиченість рослинного покриву. Головною характеристикою рослинності є наявність спрощених таксономічних одиниць рослин різного рангу, що свідчить про несприятливість умов навколишнього середовища для таких рослин. На відвалі ростуть наступні дерева та чагарники: абрикоса звичайна (*Prunus armeniaca*), тополя біла (*Populus alba*), робонія звичайна (*Robinia pseudoacacia*), липа дрібнолиста (*Tilia cordata* Mill), горіх волоський (*Juglans regia* L), яблуня лісова (*Malus sylvestris* Mill.), береза пухнаста (*Betula pubescens*), вишня дика (*Prunus cerasus* L.), клен ясенелистий (*Acer negundo* L.), маслина вузьколиста (*Elaeagnus angustifolia* L.), шипшина звичайна (*Rosa canina* L.).

Серед трав'янистих рослин були помічені: сокирки польові (*Consolida regalis*), молочай південноєвропейський (*Euphorbia nicaeensis*), жабриця звивиста (*Seseli tortuosum*), звіробій (*Hypericum* L), перловник трансильванський (*Melica transsilvanica*), очиток скельний (*Sedum cauticola*), мундулея (*Mundulea Benth*), дурман (*Datura*), лобода біла (*Chenopodium album*), блошина смердюча (*Mentha pulegium* L.), липучка (*Lappula myosotis*), очиток відхилений (*Sedum reflexum*), лапчатка повзуча (*Potentilla reptans*). Загалом, було ідентифіковано понад 50 видів рослин, що успішно адаптувались в умовах відвалу [14].

Верхній ярус відвалу є особливо важливим для дослідження через його безпосередній вплив на поверхневі екосистеми, мікроклімат і можливі ризики для здоров'я населення. Дослідження рослинності верхнього ярусу відвалу дозволяє оцінити ступінь природного відновлення екосистеми та визначити найбільш ефективні види рослин для використання у процесі рекультивації.

Серед дерев верхньому ярусі виявлено наступні види: слива дика (*Prunus domestica*), маслинка срібляста (*Elaeagnus commutata*), горіх грецький (*Juglans regia* L.), яблуня лісова (*Malus sylvestris* Mill), робонія псевдоакація (*Robinia pseudoacacia*) та абрикос звичайний (*Armeniaca vulgaris* Lam). Трав'янисті рослини представлені наступними видами: татар-

ник звичайний (*Onopoidon acanthium*), кульбаба лікарська (*Taraxacum officinale*), синяк звичайний (*Echium vulgare*), цикорій дикий (*Cichorium intybus* L.), цинадон пальчастий (*Cynodon dactylon*), морква дика (*Daucus carota*), петлуха звичайна (*Calystegia sepium*), ячмінь мишачий (*Hordeum murinum* L), білий авен (*Geum canadense*).

Рослинність верхнього ярусу відвалу характеризується високою стійкістю до ерозійних процесів і потенціалом для природного відновлення різноманіття. Попри складніші умови через ерозійні процеси, верхній ярус демонструє стійке формування рослинних угруповань, що є позитивним індикатором природного самовідновлення екосистеми.

Спираючись на дослідження рослинних угруповань, можна скласти екологічну характеристику відвалу Петровський, де верхній ярус характеризується значним розмаїттям деревних та низькорослих рослин. Дерева такі як робонія псевдоакація та слива дика заселяють нові території та покращують ґрунтові умови. Низькорослі рослини, такі як цинадон пальчастий та кульбаба лікарська, допомагають закріпити ґрунти та створити сприятливі умови для інших видів. Значне поширення цинадону пальчастого свідчить про його значну роль у процесі рекультивації.

Нижній ярус відвалу демонструє менш сприятливі умови для рослинного покриву, що проявляється в наявності спрощених таксономічних одиниць. Рослини нижнього ярусу включають більш різноманітні види дерев, такі як тополя біла та липа дрібнолиста, які можуть свідчити про намагання рослин пристосуватись до несприятливих умов. Трав'янисті рослини, такі як перловник трансильванський та лобода біла, свідчать про їхню високу адаптацію до техногенних умов.

Дослідження біокрастових мікроорганізмів в техноземах відвалу. Залізорудний відвал «Петровський» є цікавим «полігоном» для дослідження біокрастових (біологічної ґрунтової кірки) бактерій, бо тут поєднуються типові для постмаїнінгових ландшафтів чинники: низька родючість, дефіцит гумусу, різко неоднорідний гранулометричний склад, локальні екстремуми рН та підвищені концентрації окремих металів.

У початкових стадіях сукцесії на відвалах залізорудних підприємств Криворіжжя ключову роль відіграють ціанобактерії та еукаріотичні водорості як «архітектори» біокірки: вони продукують екзополісахариди, що цементують частинки, накопичують органічний вуглець і формують умови для гетеротрофних бактерій (у т.ч. азотфіксаторів, фосфатмобілізаторів тощо). Для залізорудних хвостосховищ Криворіжжя показано, що структура угруповань ціанобактерій та водоростей на ранніх стадіях істотно залежить від мінералогії, солоності, рН, вмісту фізичної глини та гумусу, а також описано етапи розвитку «водоростево-ціанобактеріальних» спільнот аж до змішаних мохово-водоростевих кірок

[15]. Ці закономірності безпосередньо релевантні для «Петровського» відвалу, де параметри субстрату також контрастні між ділянками.

З екологічної точки зору біокрастові консорції (ціанобактерії, водорості, бактерії, мікрогриби) виконують “пакет” функцій, критичних для стабілізації техногенних поверхонь: зменшення водної/вітрової ерозії, підвищення утримання вологи, первинне накопичення С і N, поліпшення мікроструктури поверхневого шару.

В рамках дослідження біорізноманіття відвалу відібрано проби ґрунту (технозем) з 12 точок верхнього та нижнього ярусів відвалу з метою дослідження бактерій біокрасту. Для дослідження видового різноманіття біокрастового субстрату використано світловий мікроскоп з 400-кратним збільшенням.

На рис. 2, а представлено одноклітинну зелену водорість, морфологічно близьку до представників роду *Chlorococcum* (*Chlorophyta*), виявлену у складі біологічної ґрунтової кірки техногенного субстрату. Клітини поодинокі або формують невеликі агрегати, мають правильну сферичну або субсферичну форму та чітко виражену клітинну оболонку. Діаметр клітин варіює орієнтовно в межах 5-15 мкм. Внутрішній простір клітини заповнений щільним зеленим хлоропластом, який займає більшу частину об'єму та має зернисту структуру, характерну для фотосинтезуючих еукаріотичних мікрододеростей. Ознак нитчастої організації, гетероцист або спеціалізованих диференційованих клітин не виявлено. Морфотип відповідає кокоїдним зеленим водоростям, типовим для ранніх стадій формування біокрасту. Представники роду *Chlorococcum* є піо-

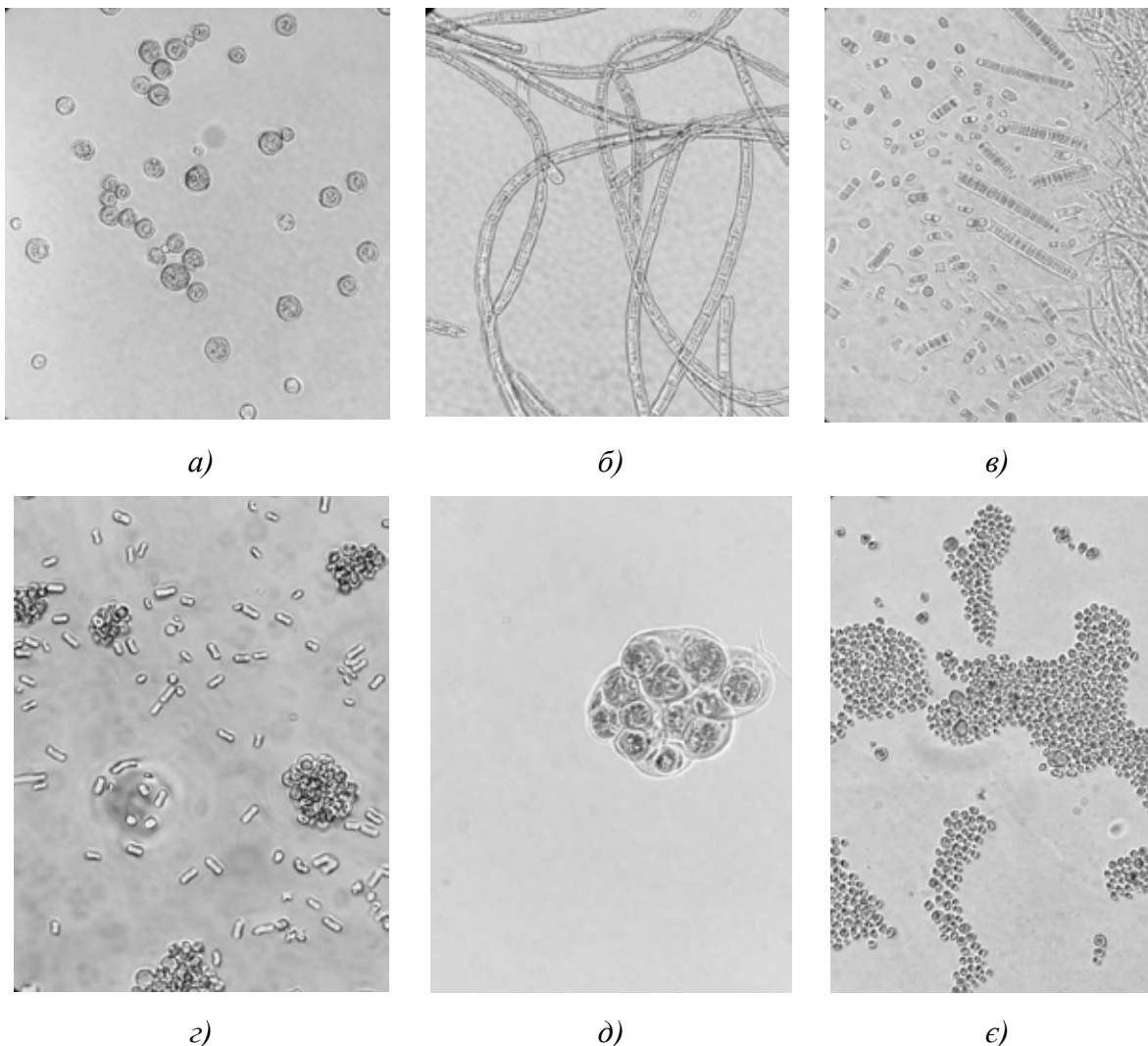


Рис. 2. Видове біорізноманіття біокрастового субстрату відвалу: а) одноклітинні зелені водорості роду *Chlorococcum* sp.; б) фотосинтезуюча нитчаста ціанобактерія роду *Leptolyngbya* sp. (порядок *Oscillatoriales*); в) фотосинтезуюча нитчаста ціанобактерія роду *Phormidium* sp.; г) паличкоподібні бактерії роду *Bacillus* та кокоїдні ціанобактерії *Gloeocapsa* sp.; д) одноклітинні зелені водорості роду *Gloeocystis*; е) кокоїдні ціанобактерії роду *Arhanocapsa*

нерними фототрофами, здатними колонізувати бідні на органічну речовину субстрати з високою інсоляцією. У межах техногенних порушених територій вони виконують функцію первинних продуцентів, забезпечуючи акумуляцію органічного вуглецю та ініціюючи формування мікробної біоплівки. Їх розвиток сприяє стабілізації поверхні субстрату через виділення екзополісахаридів і створює передумови для подальшої суцесії біокрасту за участі ціанобактерій, лишайників та мохів.

На рис. 2, б представлено фотосинтезуючу нитчасту ціанобактерію, морфологічно близьку до представників роду *Leptolyngbya* (порядок *Oscillatoriales*), виявлену у складі біологічної ґрунтової кірки техногенного субстрату. Трихоми довгі, тонкі, гнучкі, складаються з циліндричних клітин, чітко відмежованих поперечними перегородками. Клітини приблизно однакової ширини по всій довжині нитки, без диференційованих гетероцист або акінет. Виразена слизова піхва або відсутня, або представлена тонким малопомітним шаром. Нитки переплітаються між собою, формуючи просторову мережу, характерну для структури зрілого біокрасту. Морфологічні ознаки відповідають типовим представникам *Leptolyngbya*, що домінують у ранніх і середніх стадіях суцесії біологічних ґрунтових кірок. Як фототрофні прокаріоти, ціанобактерії цього роду здійснюють активний фотосинтез та забезпечують первинну акумуляцію органічного вуглецю на бідних мінеральних субстратах. Виділення екзополісахаридів сприяє склеюванню мінеральних часток, стабілізації поверхні та формуванню мікроагрегатів. У межах техногенних порушених територій такі організми виконують ключову роль у біологічній стабілізації субстрату та створюють передумови для подальшої колонізації лишайниками і мохами.

На рис. 2, в представлено фотосинтезуючу нитчасту ціанобактерію роду *Phormidium*, виявлену у складі біологічної ґрунтової кірки техногенного субстрату. Трихоми довгі, прямі або слабо зігнуті, з чітко вираженою поперечною сегментацією та рівномірною шириною по всій довжині. Клітини короткоциліндричні або злегка бочкоподібні, розташовані послідовно без формування гетероцист чи акінет. Термінальні клітини закруглені, слизова піхва тонка або малопомітна. Інтенсивне зелене забарвлення зумовлене наявністю фотосинтетичних пігментів (хлорофілу а та фікобіліпротеїнів), що забезпечують активний фотосинтез. Представники роду *Phormidium* є типовими компонентами біокрастів аридних, напіваридних і техногенно порушених екосистем. Вони активно колонізують мінеральні субстрати з низьким вмістом органічної речовини та високою інсоляцією. Завдяки виділенню екзополісахаридів ці ціанобактерії стабілізують поверхню субстрату, сприяють агрегації мінеральних часток і зменшують ерозійні процеси. Формування трихомів *Phormidium* створює структурну матрицю біоло-

гічної кірки, що ініціює подальшу суцесію мікроорганізмів і рослинності на деградованих територіях.

В біокрасті також домінують типові гетеротрофні бактерії роду *Bacillus*, а також щільні зеленуваті скупчення дрібних округлих клітин кокоїдних фототрофів кокоїдних ціанобактерій родів *Chroococcus* та *Gloeocapsa* (рис. 4, з). На тлі бактеріальної фракції спостерігаються локальні скупчення пігментованих округлих клітин, інтерпретовані як кокоїдні фототрофні мікроорганізми (ціанобактерії або зелені мікроводорості), асоційовані з органо-мінеральними мікроагрегатами. Загальна картина відображає змішану структуру біокрастової мікробіоти, де гетеротрофні бактерії та фототрофні мікроорганізми співіснують у складі біоплівкового матриксу.

На рис. 4, д показано компактну колонію округлих клітин зелених одноклітинних організмів у спільному прозорому матриксі, які належать до одноклітинних зелених водоростей роду *Gloeocystis*. Клітини мають виразну пігментацію та зернистий внутрішній вміст, що відповідає зеленим водоростям (*Chlorophyta*), типовим супутникам біокрастів.

В зразках ґрунту значно представлені кокоїдні ціанобактерії біокрасту роду *Aphanocapsa* (рис. 4, є). Колоніальні кокоїдні фототрофи утворюють щільні агрегати та витягнуті "стрічки" колоній, що відповідає розміщенню мікроорганізмів у слизовому (екзополісахаридному) матриксі біокрасту. Морфологічно спостережувані структури узгоджуються з кокоїдними ціанобактеріями *Aphanocapsa*, типовими піонерними компонентами поверхневих ґрунтових біокірок.

Головні висновки. Таким чином, дослідження біорізноманіття фітоценозу та біокрасту промислового відвалу «Петровський» ПрАТ «ЦГЗК» м. Кривий Ріг свідчить про синергійну роль рослин і мікробіоти на техноземах для відновлення довкілля. Рослинність нижнього ярусу перебуває на стадії активної стабілізації, з тенденцією до формування більш стійких фітоценозів. Наявність значної частки аборигенних видів серед трав'янистих рослин свідчить про природне відновлення екосистеми, тоді як присутність інтродуцентів серед деревно-чагарникових форм вказує на антропогенний вплив, зокрема через посадки або занесення насіння. Рослинність верхнього ярусу демонструє кращу адаптацію та потенціал для природного відновлення, завдяки більшому розмаїттю видів та їх кількості. Низькорослі рослини верхнього ярусу грають ключову роль у процесі рекультиватії.

У зразках біокрасту із залізородного відвалу «Петровський» (400×) зафіксовано виразно змішану фототрофно-гетеротрофну спільноту мікроорганізмів. Домінують нитчасті ціанобактерії *Oscillatoriales* (морфотип *Phormidium* та *Leptolyngbya*), що формують переплетену біоплівку та, ймовірно, забезпечують ключову структуроутворюючу функцію (зв'язування частинок суб-

страту екзополісахаридами). Паралельно присутні кокоїдні ціанобактерії (*Chroococcus*, *Gloeocapsa*, *Aphanocapsa*), колоніальні та поодинокі зелені мікродорості (*Chlorella*, *Chlorococcum*, *Bracteacoccus*), та численні гетеротрофні паличкоподібні бактерії, асоційовані з детритом і мікроагрегатами. Така композиція свідчить про сформований біокраст із високим потенціалом до первинної продукції, акумуляції органічної речовини та стабілізації поверхні техногенного субстрату.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані дані є важливими для подальшого

планування заходів рекультивації техногенних територій. Вони дають змогу врахувати видову структуру та життєвий стан рослин при розробці екологічно доцільних методів відновлення. Виявлена позитивна динаміка вегетаційного покриву та різноманітний склад біокрастових бактерій і водоростей свідчить про потенційну можливість самовідновлення фітоценозів. Це дозволяє сформувати науково обґрунтовану “карту” піонерних консорціумів та підібрати найефективніші біологічні рішення для стабілізації й відновлення техногенних ландшафтів Кривбасу.

Література

1. Енциклопедія Криворіжжя / В. П. Бухтіяров, В. Г. Балалкін, О. І. Прокопчук [та ін.] ; за ред. В. П. Бухтіярова. – Кривий Ріг : ЯВВА, 2005. – [Електронний ресурс]. <https://corpus.encyclopedia.kyiv.ua/item/56> (дата звернення: 13.03.2026).
2. Антонік І. П., Антонік В. І., Штанько Л. О. Кривбас – територія екологічної небезпеки. *Scientific Achievements of Modern Society* : Abstracts of the 10th International Scientific and Practical Conference. Liverpool, 2020. P. 221–231. – DOI: 10.31812/123456789/3939.
3. Savosko V. M. Ecological and geological determination of the initial pedogenesis on devastated lands in the Kryvyi Rih Iron Mining & Metallurgical District (Ukraine). *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2019. Vol. 28, № 4. DOI: 10.15421/111969.
4. Savosko V. M., Bielyk Y. V., Lykholat Y. V., Heilmeyer H. Assessment of heavy metals concentration in initial soils of post-mining landscapes in Kryvyi Rih District (Ukraine). *Ekológia* (Bratislava). 2022. Vol. 41, № 3. P. 201–211. DOI: 10.2478/eko-2022-0020.
5. Savosko V. M., Bielyk Y. V., Lykholat Y. V., Heilmeyer H., Grygoryuk I., Khromykh N., Lykholat T. The total content of macronutrients and heavy metals in the soil on devastated lands at Kryvyi Rih Iron Mining & Metallurgical District (Ukraine) *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2021. Vol. 30, № 1. P. 153–164. DOI: 10.15421/112114.
6. Bielyk Y., Savosko V., Lykholat Y., Heilmeyer H., Grygoryuk I. Macronutrients and heavy metals contents in the leaves of trees from the devastated lands at Kryvyi Rih District (Central Ukraine). *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 166. Art. 01011. DOI: 10.1051/e3sconf/202016601011.
7. Белик Ю.В., Савосько В.М., Лихолат Ю.В., Іжболдін О.О., Лихолат Т.Ю. Варіабельність умісту фенольних сполук у листках дерев, які природно поширені на девастрованих землях залізрудного відвалу. *Питання степового лісознавства та лісової рекультивації земель*. 2022. Вип. 51. С. 73–86. DOI: 10.15421/442207.
8. Pavlenko A. O., Krasova O. O., Korshykov I. I. Syngeneses processes on iron ore dumps in the northern part of Kryvyi Rih area *Ukrainian Botanical Journal*. 2017. Vol. 74, № 4. P. 360–372. DOI: 10.15407/ukrbotj74.04.360.
9. Лисогор Л. П., Красова О.О., Коршиков І.І. Дендрофлора модельних залізрудних відвалів Криворіжжя: структурний аналіз, здатність до колонізації техногенних екоотопів. *Автохтонні та інтродуковані рослини*. 2017. № 13. С. 36–44.
10. Белик Ю.В., Савосько В.М., Лихолат Ю. В. Таксономічний склад та синантропна характеристика деревно-чагарникових угруповань Петровського відвалу (Криворіжжя). *Екологічний вісник Криворіжжя*. 2019. № 4. С. 104–113. DOI: 10.31812/eco-bulletin-krd.v4i0.2565.
11. Белик Ю., Савосько В., Лихолат Ю. Сучасний стан дендрофітоценозів, природно поширених на девастрованих землях залізрудного відвалу (Кривий Ріг). *Екологічний вісник Криворіжжя*. 2023. С. 25–43. DOI: 10.31812/ecobulletinkrd.v7i.7654.
12. Мазур А.Ю., Кучеревський В.В., Шоль Г.Н., Баранець М.О., Сіренко Т.В., Красноштан О.В. Біотехнологія рекультивації залізрудних відвалів шляхом створення стійких трав'янистих рослинних угруповань. *Наука та інновації*. 2015. Vol. 11, № 4. P. 41–52. DOI: 10.15407/scin11.04.041.
13. Сметана, О. М., Перерва В. В. *Біогеоценотичний покрив ландшафтно-техногенних систем Кривбасу*: Криворіз. ботан. сад НАН України. – Кривий Ріг: Видавничий дім, 2007. 247 с. ISBN 978-966-2915-05-1.
14. Баланюк А. Д., Ковров О. С. Значення відвалів та екологічний вплив Петровського відвалу на Криворіжжі. *Тиждень студентської науки – 2025* : матер. 80-ї студ. наук.-техн. конф., 21–25 квіт. 2025 р. Дніпро : НТУ «ДП», 2025. С. 313–314. https://ecology.nmu.org.ua/ua/Studies/StudScienseWeek_2025.pdf.
15. Maltsev Y., Maltseva S., Maltseva I. Diversity of Cyanobacteria and Algae During Primary Succession in Iron Ore Tailing Dumps. *Microbial Ecology*. 2022. Vol. 83, № 2. P. 1–16. DOI: 10.1007/s00248-021-01759-y.

Дата першого надходження статті до видання: 19.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

МОНІТОРИНГ ГІДРОХІМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ РІЧКИ ТЕТЕРІВ У МЕЖАХ М. ЖИТОМИР

Бобков М.О., Піциль А.О., Никитюк Ю.А., Вишкушенко Д.А., Коморна О.М.

Поліський Національний університет

Старий бульв., 7, 10002 Житомир

bobkovmaksim412@gmail.com

У статті проаналізовано динаміку гідрохімічних показників річки Тетерів у межах м. Житомир як питного водозабору протягом 2010 – 2025 рр. Описано якісні та кількісні зміни наступних параметрів: вмісту розчиненого кисню, біохімічного споживання кисню (БСК₅), концентрації завислих речовин, амоній-іонів, нітрат-, нітрит-, сульфат-, фосфат- та хлорид-іонів, а також загального азоту. Первинні дані отримано з офіційного сайту Державного агентства водних ресурсів України за результатами щомісячного моніторингу на посту спостереження р. Тетерів (259 км від гирла). Встановлено, що концентрації більшості досліджуваних показників протягом аналізованого періоду не перевищували норм гранично допустимих концентрацій (ГДК). Виявлено окремі перевищення ГДК за показниками БСК₅ (максимум 8,80 мгО₂/дм³ у 2013 р.), амоній-іонів (пік 0,86 мг/дм³ у 2021 р.) та фосфат-іонів (аномальний сплеск 0,91 мг/дм³ у 2012 р.), що свідчить про вплив антропогенного навантаження на водний об'єкт.

Зафіксовано тенденцію до зростання концентрації амоній-іонів у 2023 – 2025 рр., що є індикатором прогресуючого азотного забруднення водозабору. За результатами оцінювання якості води відповідно до ДСТУ 4808:2007 «Джерела централізованого питного водопостачання. Гігієнічні та екологічні вимоги щодо якості води і правила вибирання», встановлено, що інтегральний клас якості води р. Тетерів протягом 2010 – 2025 рр. стабільно відповідав 2 класу («добра», чиста вода прийнятної якості) і коливається в діапазоні 1,58 – 1,73, що підтверджує придатність водозабору для централізованого питного водопостачання із застосуванням стандартної схеми очищення.

Якість води р. Тетерів залежить як від абіотичних чинників (гідрологічний режим, температурний режим, атмосферні опади), так і від антропогенних факторів: надходження забруднювальних речовин із поверхневим стоком з урбанізованої території, скиду недостатньо очищених комунально-побутових стічних вод підприємств м. Житомир, а також процесів евтрофікації, що посилюються в останні роки. Отримані результати можуть бути використані органами управління водними ресурсами та підприємствами водопостачання для планування водоохоронних заходів і модернізації систем водопідготовки. *Ключові слова:* р. Тетерів, питний водозбір, гідрохімічні показники, моніторинг, БСК₅, амоній-іони, фосфат-іони, ДСТУ 4808:2007, клас якості води, антропогенне навантаження.

Monitoring of Hydrochemical Indicators of the Teteriv River within the City of Zhytomyr. Bobkov M., Pitsil A., Nykytiuk Yu., Vyskushenko D., Komorna O.

The article analyzes the dynamics of hydrochemical indicators of the Teteriv River within the city of Zhytomyr as a source of drinking water intake over the period 2010–2025. Qualitative and quantitative changes in the following parameters are described: dissolved oxygen content, biochemical oxygen demand (BOD₅), concentration of suspended solids, ammonium ions, nitrate, nitrite, sulfate, phosphate and chloride ions, as well as total nitrogen. Primary data were obtained from the official website of the State Agency of Water Resources of Ukraine based on monthly monitoring results at the observation post on the Teteriv River (259 km from the mouth). It was established that the concentrations of most studied indicators during the analyzed period did not exceed the maximum permissible concentrations (MPC).

At the same time, isolated exceedances of MPC were detected for BOD₅ (maximum 8.80 mg O₂/dm³ in 2013), ammonium ions (peak 0.86 mg/dm³ in 2021), and phosphate ions (anomalous spike of 0.91 mg/dm³ in 2012), indicating the impact of anthropogenic pressure on the water body.

A tendency toward an increase in ammonium ion concentrations in 2023–2025 was recorded, which serves as an indicator of progressive nitrogen pollution of the water intake. According to the water quality assessment based on DSTU 4808:2007 “Sources of centralized drinking water supply. Hygienic and environmental requirements for water quality and rules for selection”, it was determined that the integrated water quality class of the Teteriv River during 2010–2025 consistently corresponded to Class 2 (“good”, clean water of acceptable quality) and ranged between 1.58 and 1.73. This confirms the suitability of the water intake for centralized drinking water supply using standard treatment processes.

The water quality of the Teteriv River is influenced by both abiotic factors (hydrological regime, temperature conditions, atmospheric precipitation) and anthropogenic factors, including pollutant inflow from surface runoff of urbanized areas, discharge of insufficiently treated municipal wastewater from enterprises in Zhytomyr, as well as eutrophication processes that have intensified in recent years. The obtained results can be used by water resource management authorities and water supply enterprises for planning water protection measures and modernization of water treatment systems. *Key words:* Teteriv River, drinking water intake, hydrochemical indicators, monitoring, BOD₅, ammonium ions, phosphate ions, DSTU 4808:2007, water quality class, anthropogenic impact.



Постановка проблеми. Якість питної води є одним із ключових чинників, що визначає санітарно-епідеміологічний стан населення та рівень екологічної безпеки регіону. Житомирське Полісся характеризується розвинутою гідрографічною мережею, ключовим об'єктом якої є річка Тетерів – права притока Дніпра першого порядку довжиною 363 км із площею водозбірного басейну 15 100 км², що включає 130 притоків різного порядку [1]. Річка забезпечує основні потреби регіону у водних ресурсах, а питне водопостачання м. Житомир. Це вимагає безперервного контролю якості води та відповідності її складу встановленим нормативам, що підтверджується чисельними дослідженнями водних об'єктів регіону [2, 3].

Гіdroхімічний режим річки формується під впливом геологічної будови басейну та інтенсивної господарської діяльності. Водозбір р. Тетерів характеризується значною часткою сільськогосподарських угідь, що зумовлює дифузне надходження біогенних речовин та органічних забруднювачів до водних об'єктів [1]. Гіdroлогічний режим річки суттєво трансформований внаслідок зарегульованості стоку каскадом водосховищ, найбільшими з яких у межах Житомирської області є Денишівське та Відсічне [4].

Окрему проблему становить антропогенний вплив у межах урбанізованої території: надходження забруднювальних речовин із поверхневим стоком, скид недостатньо очищених комунально – побутових стічних вод, а також процеси евтрофікації, що посилюються в останні роки [2, 3]. Підвищення концентрацій біогенних елементів – амоній-іонів, нітрит- та фосфат-іонів – є індикатором погіршення якості води у водозборі та потребує систематичного контролю [5, 6]. За таких умов системний моніторинг гіdroхімічних показників водозбору набуває першочергового практичного значення для забезпечення якості питної води та своєчасного виявлення екологічних ризиків для здоров'я населення.

Важливим аспектом сучасних екологічних досліджень є не лише фіксація концентрацій речовин та їх порівняння з нормативами ГДК, а й комплексна оцінка стану водних об'єктів згідно з чинними державними стандартами. Застосування методики ДСТУ 4808:2007 «Джерела централізованого питного водопостачання. Гігієнічні та екологічні вимоги щодо якості води і правила вибирання» дозволяє класифікувати воду за категоріями якості, що є необхідним для прийняття обґрунтованих управлінських рішень щодо модернізації систем водопідготовки та охорони водних ресурсів [10]. Аналіз динаміки гіdroхімічних показників за тривалий період (2010 – 2025 рр.) у поєднанні з оцінкою класів якості дозволяє виявити тенденції змін стану водозбору та своєчасно оцінити екологічні ризики для населення [9].

Мета роботи: проаналізувати динаміку гіdroхімічних показників р. Тетерів у створі питного

водозбору м. Житомир за період 2010 – 2025 рр., здійснити комплексну оцінку якості води відповідно до вимог ДСТУ 4808:2007 та виявити ключові абіотичні й антропогенні чинники впливу на стан водного середовища.

Актуальність дослідження. Проблема якості поверхневих вод у басейні р. Тетерів набула особливої гостроти в контексті зростаючого антропогенного навантаження на водні екосистеми Житомирського Полісся. Незважаючи на те, що загальний стан водозбору залишається задовільним, тенденції до зростання концентрацій амоній-іонів та органічного забруднення (БСК₅), зафіксовані після 2019 р., свідчать про прогресуюче погіршення якості води. Це вимагає не лише поточного контролю відповідності нормативам ГДК, а й комплексної оцінки якості за класифікаційними критеріями ДСТУ 4808:2007, що дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо водопідготовки та охорони водних ресурсів регіону.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження виконане в рамках вирішення актуального науково-практичного завдання – забезпечення екологічної безпеки централізованого питного водопостачання м. Житомир на основі аналізу багаторічної динаміки гіdroхімічних показників р. Тетерів. Результати роботи безпосередньо пов'язані з практичними потребами органів управління водними ресурсами, підприємств водопостачання та природоохоронних органів у достовірній інформації про стан водозбору для планування водоохоронних заходів та модернізації систем водопідготовки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання якості поверхневих вод басейну р. Тетерів та суміжних водних об'єктів Житомирського Полісся досліджувалися у ряді наукових робіт. Зокрема, Кірейцева Г.В. та співавтори [2] проаналізували проблему евтрофікації р. Тетерів в межах урбоєкосистеми м. Житомир та запропонували підходи до оптимізації водокористування. Скиба Г.В. та ін. [3] досліджували вміст важких металів у поверхневих водах урбанізованих ділянок річки. Геосистемні характеристики р. Тетерів, включаючи гіdroлогічний режим та трансформацію стоку каскадом водосховищ, висвітлено у роботі Шевчук Л.В. та ін. [4]. Екологічне оцінювання якості поверхневих вод Житомирського Полісся в цілому здійснено Салієм П.М. та співавторами [12], що дозволяє порівнювати отримані результати в регіональному контексті. Вплив кліматичних змін на водні ресурси басейну р. Тетерів досліджено у роботі міжнародного авторського колективу за участю українських вчених [1]. Разом з тим, комплексний аналіз динаміки гіdroхімічних показників р. Тетерів саме у створі питного водозбору м. Житомир за тривалий сучасний період (2010 – 2025 рр.) із застосуванням класифікаційного підходу ДСТУ 4808:2007 у науковій літературі представлений недостатньо.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття та новизна досліджень. Попри наявність окремих досліджень водних об'єктів Житомирського Полісся, у науковій літературі відсутній систематизований аналіз багаторічної динаміки повного комплексу гідрохімічних показників р. Тетерів у створі питного водозабору м. Житомир за період 2010 – 2025 рр. Невирішеним залишається питання комплексної оцінки якості води цього водозабору відповідно до вимог ДСТУ 4808:2007 на основі тривалих рядів спостережень. Новизна дослідження полягає у вперше проведеному комплексному аналізі 16-річної динаміки 10 гідрохімічних показників р. Тетерів у створі питного водозабору м. Житомир (2010 – 2025 рр.) із визначенням інтегрального класу якості води за ДСТУ 4808:2007 та виявленням тенденції до прогресуючого зростання азотного забруднення після 2019 р.

Методологічне або загальнонаукове значення.

Методологічне значення дослідження полягає у застосуванні комплексного підходу до оцінки якості питних поверхневих вод, що поєднує: порівняльний аналіз концентрацій забруднювальних речовин з нормативами ГДК для водойм господарсько-питного призначення; класифікацію якості води за ДСТУ 4808:2007 з розрахунком інтегрального класу як середнього арифметичного класів окремих показників; аналіз багаторічної динаміки із виявленням статистично значущих тенденцій. Запропонований підхід може бути адаптований для оцінки якості інших джерел централізованого питного водопостачання України та використаний при розробці регіональних програм моніторингу водних ресурсів.

Виклад основного матеріалу. Матеріалом для написання статті слугували дані щодо гідрохімічних показників р. Тетерів у межах м. Житомир, які були отримані з офіційного сайту Державного агентства водних ресурсів України [8] за 2010 – 2025 рр. Пост спостереження розташований на р. Тетерів, 259 км від гирла, у межах питного водозабору м. Житомир. Відповідно до програми моніторингу поверхневих вод [9], визначення гідрохімічних показників здійснювалось у контрольному створі щомісячно. Місця та кількість відбору проб визначались відповідно до чинних нормативних документів.

Нами було проаналізовано динаміку таких гідрохімічних показників: вміст розчиненого кисню ($\text{мгО}_2/\text{дм}^3$), біохімічне споживання кисню (БСК_5 , $\text{мгО}_2/\text{дм}^3$), концентрація завислих речовин ($\text{мг}/\text{дм}^3$), амоній-іонів ($\text{мг}/\text{дм}^3$), нітрат-іонів ($\text{мг}/\text{дм}^3$), нітрит-іонів ($\text{мг}/\text{дм}^3$), сульфат-іонів ($\text{мг}/\text{дм}^3$), фосфат-іонів ($\text{мг}/\text{дм}^3$), хлорид-іонів ($\text{мг}/\text{дм}^3$) та загального азоту ($\text{мг}/\text{дм}^3$). Отримані дані порівнювались із встановленими нормативами гранично допустимих концентрацій (ГДК) відповідно до чинного санітарного законодавства України [10]. Статистична обробка результатів включала розрахунок середніх річних

значень, мінімальних та максимальних концентрацій кожного показника. Графічне представлення динаміки показників здійснено у вигляді лінійних графіків із відображенням діапазону мін – макс та рівня ГДК.

Оцінювання якості води р. Тетерів здійснено відповідно до ДСТУ 4808:2007 «Джерела централізованого питного водопостачання. Гігієнічні та екологічні вимоги щодо якості води і правила вибирання» [10]. Для кожного показника визначався клас якості відповідно до нормативних меж, передбачених стандартом. Інтегральний (зведений) клас якості розраховувався як середнє арифметичне класів всіх аналізованих показників за рік.

Отримані дані порівнювались із нормативами ГДК для водойм господарсько-питного призначення [10], а також використовувались для комплексної оцінки якості води відповідно до ДСТУ 4808:2007.

Комплексний аналіз гідрохімічного стану р. Тетерів у створі питного водозабору м. Житомир базувався на результатах багаторічного моніторингу за період 2010–2025 рр. Дослідження охоплювало 10 ключових фізико-хімічних параметрів, що дозволяють оцінити санітарно-гігієнічний стан водойми та інтенсивність антропогенного впливу (табл. 1).

Статистичні характеристики показників якості води питного водозабору м. Житомир представлені в таблиці 2 у кожній клітинці верхнє значення середнє річне, нижнє – діапазон мін – макс; «–» – показник не вимірювався. тоді як багаторічна динаміка концентрацій основних параметрів представлена на рисунках 1–5 з урахуванням мінімальних і максимальних значень та їх співвідношення з гранично допустимими концентраціями (ГДК) у 2010 – 2025 рр.

Кисневий режим та органічне забруднення. Вміст розчиненого кисню є одним із фундаментальних показників екологічного стану водойми, що відображає інтенсивність процесів самоочищення та рівень органічного навантаження [5]. Протягом аналізованого періоду середні річні значення залишалися на достатньому рівні – від $9,63 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$ у 2023 р. до $12,65 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$ у 2011 р., що суттєво перевищує мінімально допустиме значення ГДК ($4,0 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$). Такий рівень насиченості води киснем свідчить про задовільний стан аеробних процесів у водоймі та достатній потенціал самоочищення протягом більшої частини року.

Водночас аналіз діапазонів мін–макс виявив тривожну тенденцію: у 2013 р. мінімальні значення знижувалися до $1,72 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$, а у 2023 р. – до $4,28 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$, (рис. 3) що є критично близьким до нижньої межі норми. Подібне зниження характерне для літньої межени, коли підвищення температури води зменшує розчинність кисню, а інтенсифікація біохімічного розкладу органічних речовин збільшує його споживання [5]. Нижче $4,0 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$ починаються заморні явища та пригнічення гідробіонтів,

Таблиця 1

Середні річні значення гіdroхімічних показників р. Тетерів (2010 – 2025 рр.)

Показник	ГДК	Одиниці	Мін.серед.	Макс.серед	Рік мін.	Рік макс.
Розчинений кисень	>=4.0	мгО ₂ /дм ³	9.63	12.65	2023	2011
БСК ₅	3.0	мгО ₂ /дм ³	0.98	3.11	2016	2010, 2025
Завислі речовини	15.0	мг/дм ³	5.23	7.16	2015	2010
Амоній-іони	0.5	мг/дм ³	0.27	0.86	2016	2021
Нітрат-іони	40.0	мг/дм ³	1.47	3.00	2017	2013
Нітрит-іони	0.08	мг/дм ³	0.02	0.05	2016, 2020	2013
Сульфат-іони	100.0	мг/дм ³	35.43	58.58	2020	2016
Фосфат-іони	0.1	мг/дм ³	0.03	0.16	2018	2012
Хлорид-іони	300.0	мг/дм ³	23.09	32.44	2019	2025
Загальний азот	1.0	мг/дм ³	0.50	0.86	2019	2021

Таблиця 2

Статистичні характеристики показників якості води питного водозабору м. Житомир

Рік	Азот заг., мг/дм ³	Амоній-іони, мг/дм ³	БСК ₅ , мгО ₂ /дм ³	Завислі реч., мг/дм ³	Кисень розч., мгО ₂ /дм ³	Нітрати, мг/дм ³	Нітрити, мг/дм ³	Сульфати, мг/дм ³	Фосфати, мг/дм ³	Хлориди, мг/дм ³
2010	–	0,33 0,25–0,51	3,11 1,12–5,20	7,16 5,00–11,00	10,03 6,64–13,90	1,84 0,70–4,00	0,03 0,01–0,11	38,42 26,0–64,0	0,07 0,04–0,12	28,17 21,0–45,0
2011	–	0,28 0,10–0,52	2,75 1,12–3,84	5,42 4,50–10,00	12,65 9,70–13,44	1,59 0,10–4,80	0,04 0,01–0,17	48,08 12,0–60,0	0,08 0,03–0,17	24,08 20,0–31,0
2012	–	0,39 0,16–0,66	2,64 1,36–3,20	5,34 4,00–7,50	10,21 6,00–13,00	2,64 0,70–5,40	0,04 0,01–0,31	44,83 28,0–62,0	0,16 0,01–0,91	31,36 24,0–47,0
2013	–	0,43 0,27–0,56	2,41 1,04–3,04	5,88 4,90–8,80	11,82 1,72–12,00	3,00 0,40–6,30	0,05 0,02–0,13	43,92 38,0–57,0	0,14 0,00–0,83	31,92 16,0–43,0
2014	–	0,34 0,18–0,51	2,54 1,85–3,06	5,36 4,90–6,40	11,57 2,50–13,64	2,46 0,10–4,07	0,03 0,00–0,07	39,27 27,0–48,0	0,04 0,00–0,10	26,64 18,0–47,0
2015	–	0,28 0,15–0,51	2,64 1,12–3,20	5,23 4,00–8,50	10,61 7,90–14,40	1,51 0,10–3,20	0,04 0,00–0,12	42,00 28,0–75,0	0,04 0,00–0,08	28,27 26,0–31,0
2016	–	0,27 0,15–0,48	0,98 0,04–1,38	6,06 4,00–8,20	12,01 9,97–13,80	1,60 0,60–2,20	0,02 0,01–0,07	58,58 36,0–83,0	0,12 0,00–0,85	25,83 20,0–31,0
2017	–	0,29 0,13–0,92	2,24 1,04–3,28	5,61 4,90–8,10	11,61 8,00–14,40	1,47 0,70–3,50	0,03 0,01–0,36	52,09 11,0–64,0	0,13 0,01–0,82	27,00 21,0–36,0
2018	–	0,46 0,25–0,65	2,36 1,12–3,04	5,72 2,10–7,20	11,89 9,38–14,56	1,77 0,36–4,50	0,03 0,00–0,07	40,58 20,0–58,0	0,03 0,01–0,12	24,17 20,0–33,0
2019	0,56 0,04–1,14	0,55 0,31–1,14	2,52 1,04–3,44	6,06 5,00–8,10	11,62 10,02–13,68	–	0,03 0,03–0,08	35,64 20,0–64,0	–	23,09 18,0–30,0
2020	0,59 0,34–1,13	0,59 0,34–1,13	2,41 1,12–3,20	5,99 5,20–7,30	11,39 7,20–13,36	–	–	35,45 22,0–58,0	–	29,09 21,0–38,0
2021	0,86 0,36–1,74	0,86 0,36–1,74	2,54 1,12–3,28	5,43 5,00–6,50	11,46 9,76–13,68	–	–	42,67 36,0–58,0	–	25,17 20,0–36,0
2022	0,50 0,24–0,54	0,50 0,24–0,54	2,82 2,56–3,60	5,47 5,00–6,20	10,75 4,72–13,60	–	–	42,27 35,0–48,0	–	27,00 20,0–30,0
2023	0,77 0,53–1,41	0,55 0,24–1,41	2,35 0,20–3,28	5,45 5,00–6,00	9,63 4,28–13,64	1,85 1,02–2,14	0,04 0,01–0,07	44,00 29,0–64,0	0,05 0,00–0,10	25,31 18,0–30,0
2024	0,72 0,48–1,09	0,73 0,48–1,09	2,93 1,20–3,88	5,66 5,10–6,70	11,26 9,00–13,30	1,81 0,95–2,47	0,03 0,01–0,06	46,91 32,0–61,0	0,07 0,00–0,11	29,55 23,0–45,0
2025	0,66 0,42–0,86	0,66 0,42–0,86	3,11 1,12–4,40	5,55 5,40–5,90	12,04 10,08–17,44	1,82 1,00–2,86	0,03 0,02–0,05	51,00 38,0–67,0	0,07 0,00–0,09	32,44 24,0–54,0

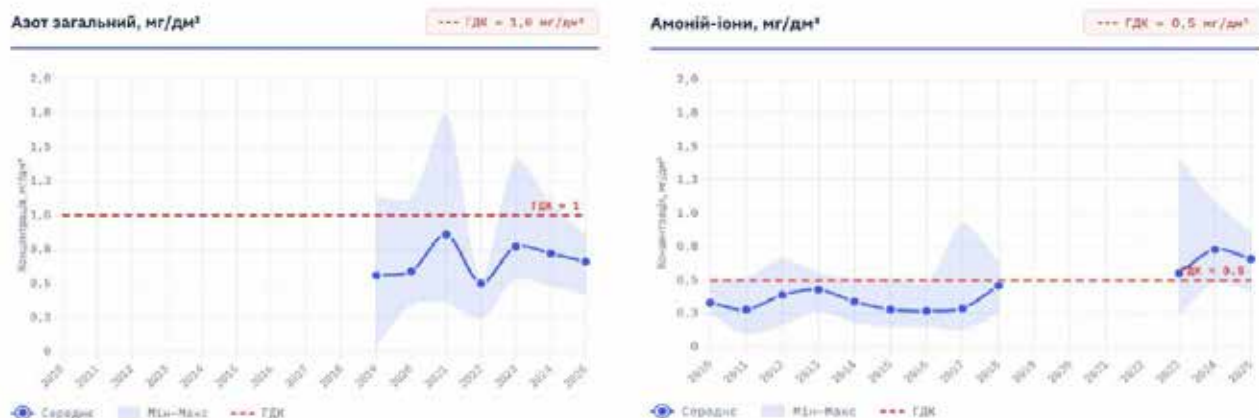


Рис. 1. Концентрація сполук азоту мг/дм³



Рис. 2. Концентрація БСК₅, та завислих речовин мг/дм³

що робить такі епізодичні зниження потенційно небезпечними для екосистеми водозабору.

Показник біохімічного споживання кисню (БСК₅) є прямим індикатором вмісту біохімічних лабільних органічних сполук у воді [6]. Протягом усього аналізованого періоду він коливався в межах 2,35 – 3,11 мгО₂/дм³ і стабільно перебував на рівні або вище нормативного значення ГДК (3,0 мгО₂/дм³), (рис. 2) Зокрема, у 2010 та 2025 рр. середнє значення БСК₅ становило 3,11 мгО₂/дм³, тобто знаходилося безпосередньо на межі допустимого.

Аналіз максимальних значень виявляє виражені перевищення: у 2010 р. максимальна разова концентрація сягала 5,20 мгО₂/дм³ (1,7 ГДК), у 2013 р. – 8,80 мгО₂/дм³ (2,9 ГДК), що свідчить про суттєве та нестабільне органічне навантаження на водойму. Характерним винятком є 2016 р., коли середнє значення БСК₅ знизилось до аномально низького рівня 0,98 мгО₂/дм³, що може бути пов'язано з особливостями гідрологіч-

них умов або з методичними особливостями відбору і аналізу проб. Загалом стабільно підвищені значення БСК₅ вказують на постійне надходження органічних забруднювачів до водозабору [2].

Протягом 2010 – 2025 рр. спостерігалася виражена тенденція до зростання азотного забруднення водозабору, (рис. 1) що є одним із найбільш значущих результатів проведеного моніторингу. Сполуки азоту надходять до водойми переважно зі стічними водами комунально-побутового походження, поверхневим стоком з урбанізованих територій та зливом з сільськогосподарських угідь [1, 2].

Вміст амоній-іонів у 2010 – 2018 рр. залишався відносно стабільним – у межах 0,27 – 0,46 мг/дм³, не перевищуючи ГДК (0,5 мг/дм³). Однак починаючи з 2019 р. ситуація кардинально змінилася: середні значення перевищили нормативний рівень і надалі демонстрували тенденцію до зростання. У 2019 р. середня концентрація амоній-іонів стано-



Рис. 3. Концентрація розчиненого кисню та нітрат-іонів мг/дм³



Рис. 4. Концентрація нітрит-іонів та сульфат-іонів мг/дм³

вила 0,55 мг/дм³ (1,1 ГДК), у 2020 р. – 0,59 мг/дм³, у 2021 р. зафіксовано пік забруднення – 0,86 мг/дм³ (1,7 ГДК), а максимальна разова концентрація у цьому році сягала 1,74 мг/дм³, що у 3,5 рази перевищує норму. У 2023 – 2025 рр. показник дещо знизився, однак залишався вище допустимого рівня – 0,55 – 0,73 мг/дм³. Подібна прогресуюча динаміка є індикатором постійного надходження свіжих органічних забруднень побутового походження [3] та може свідчити про недостатню ефективність роботи очисних споруд у басейні річки.

Загальний азот вимірювався (рис. 1), починаючи з 2019 р. і коливався в межах 0,50 – 0,86 мг/дм³ при ГДК 1,0 мг/дм³. Хоча перевищення норми не зафіксовано, у 2021 р. середнє значення (0,86 мг/дм³) наблизилось до граничного рівня, що узгоджується із піковими значеннями амоній-іонів у цей рік.

Вміст нітрат-іонів (рис. 3), протягом 2010 – 2018 та 2023 – 2025 рр. залишався на низькому рівні – середні значення не перевищували 3,00 мг/дм³ при ГДК 40 мг/дм³, тобто становили менше 8% від допустимої концентрації.

Вміст нітрит-іонів також стабільно не перевищував (рис. 4.), нормативу (ГДК = 0,08 мг/дм³) – середні значення коливалися в межах 0,02 – 0,05 мг/дм³. Характерне переважання амонійного азоту над нітратним та нітритним підтверджує домінування процесів амоніфікації над нітрифікацією [6], що типово для умов підвищеного органічного навантаження та епізодичного дефіциту розчиненого кисню.

Вміст сульфат-іонів протягом (рис. 4), аналізованого періоду коливався в межах 35,45 – 58,58 мг/дм³ при ГДК 100 мг/дм³, не перевищуючи нормативного рівня жодного разу. Дещо підвищені значення спостерігалися у 2016 – 2017 рр. (середні 58,58 та 52,09 мг/дм³ відповідно), однак і ці значення залишалися в межах допустимого. Загалом низький рівень сульфатів є характерною ознакою маломінералізованих прісних вод Полісся [5].

Концентрація хлорид-іонів була (рис. 5), стабільно низькою протягом усього періоду спостережень – 23,09 – 32,44 мг/дм³ при ГДК 300 мг/дм³, що становить менше 11% від допустимого рівня. Відсутність значних коливань та стабільно низькі



Рис. 5. Концентрація фосфат-іонів та хлорид-іонів мг/дм³

значення свідчать про мінімальний вплив промислових та комунальних джерел хлоридного забруднення на водозабір.

Вміст фосфат-іонів у більшості років коливався в межах 0,03 – 0,16 мг/дм³ при ГДК 0,1 мг/дм³. Перевищення норми (рис. 5), фіксувалися в окремі роки – зокрема, середні значення 0,16 мг/дм³ у 2012 р. та 0,14 мг/дм³ у 2013 р. перевищували ГДК відповідно у 1,6 та 1,4 рази. Особливо виразним є аномальний сплеск у 2012 р., коли разова концентрація сягнула 0,91 мг/дм³, що у 9,1 раза перевищує норму. Подібні аномальні піки є наслідком інтенсивного поверхневого змиву мінеральних добрив з сільськогосподарських угідь у весняний період [2]. У 2023 – 2025 рр. ситуація стабілізувалась – середні значення знаходились у межах 0,05–0,07 мг/дм³.

Середньорічна концентрація завислих речовин (рис. 2) варіювала в межах 5,23 – 7,16 мг/дм³ при ГДК 15 мг/дм³ і жодного разу не перевищувала нормативного значення. Найвищі середні значення спостерігалися у 2010 р. (7,16 мг/дм³) та 2019 р. (6,06 мг/дм³), що може бути пов'язано з підвищенням поверхневим зливом у ці роки. Починаючи з 2020 р. спостерігається стійка тенденція до зниження – середні значення стабілізувалися на рівні 5,43 – 5,99 мг/дм³. Стабільно низькі показники завислих речовин зумовлені гідротехнічною структурою річки: каскад водосховищ у басейні р. Тетерів, зокрема Денишівське та Відсічне водосховища, виконує функцію природних відстійників [4].

Основні чинники формування якості води: Аналіз отриманих даних свідчить про те, що якість води р. Тетерів у створі питного водозабору м. Житомир визначається складним поєднанням абіотичних та антропогенних чинників. Серед абіотичних факторів визначальну роль відіграють гідрологічний режим річки, температурний режим та кількість атмосферних опадів [1]. У маловодні

роки та в періоди літньої межени зменшення об'єму стоку призводить до концентрування забруднювачів та зниження розчиненого кисню. Навпаки, у повноводні роки відбувається розбавлення більшості забруднювачів, хоча одночасно може спостерігатися короткочасне підвищення вмісту завислих речовин та фосфатів.

Результати оцінювання якості води за ДСТУ 4808:2007. За значеннями показників, якими характеризувалася вода питного водозабору м. Житомир, були визначені класи якості відповідно до критеріїв ДСТУ 4808:2007 [10, 11].

Стандарт передбачає розподіл джерел централізованого питного водопостачання на чотири класи якості: від 1 (відмінна, дуже чиста вода) до 4 (погана, забруднена вода), а інтегральний клас визначається як середнє арифметичне класів за окремими показниками [11, 13]. Для порівняння отриманих результатів використовувалися дані екологічного оцінювання поверхневих вод Житомирського Полісся [12]. Розподіл значень за класами якості у розрізі досліджуваних показників протягом 2010 – 2025 рр. наведено у (табл. 3), інтегральний клас якості по роках та динаміку значень класу якості води питного водозабору наведені на рисунку 6.

Динаміка значень класу якості води питного водозабору м. Житомир протягом 2010 – 2025 рр. Розраховано за ДСТУ 4808:2007 як середнє арифметичне класів усіх показників за рік. Тіньова смуга відповідає діапазону 2 класу якості (1,5 – 2,5).

В межах досліджуваних років якість води питного водозабору м. Житомир за аналізованими гідрохімічними показниками відповідала 2 класу і змінювалася в діапазоні від 1,58 (2014 – 2015 рр.) до 1,73 (2025 р.). Відповідно до ДСТУ 4808:2007 [11], таку воду можна використовувати для централізованого питного водопостачання із застосуванням стандартної схеми очищення.

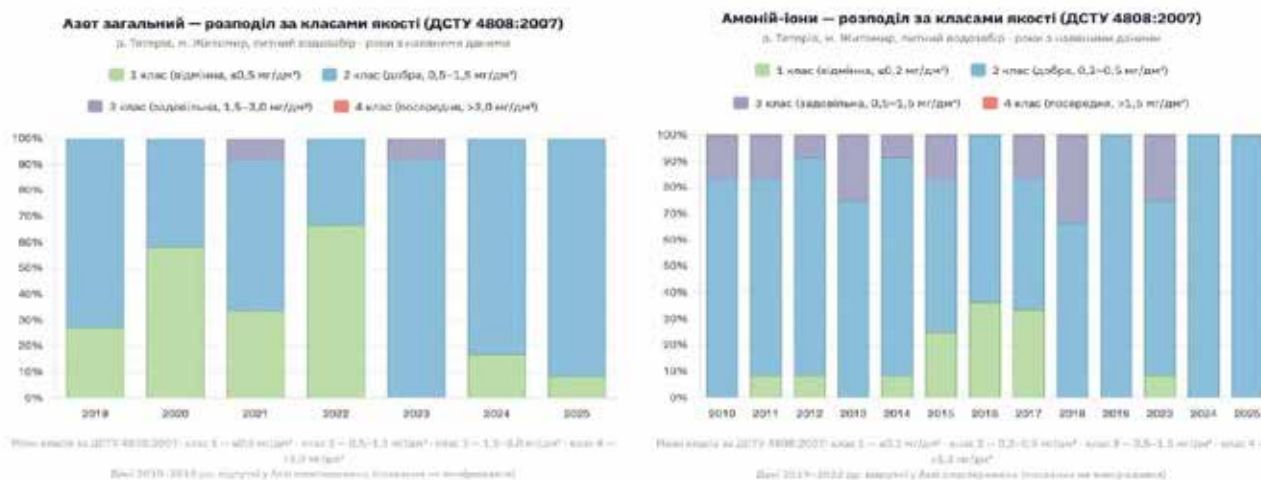
Таблиця 3

**Розподіл значень гіdroхімічних показників р.Тетерів у відсотках
за класами якості ДСТУ 4808:2007 (2010–2025 рр.)**

Показник	1 клас, %	2 клас, %	3 клас, %	4 клас, %	Мін. клас (рік)	Макс. клас (рік)
Амоній-іони	10.4	75.7	13.9	0.00	1.64 (2016)	2.33 (2018)
БСК ₅	0.00	0.00	96.3	3.7	3.00 (2011)	3.36 (2016)
Завислі речовини	17.8	82.2	0.00	0.00	1.42 (2015)	2.00 (2018)
Розчинений кисень	85.9	14.1	0.00	0.00	1.00 (2019)	1.42 (2010)
Нітрат-іони	97.2	2.8	0.00	0.00	1.00 (2010)	1.17 (2013)
Нітрит-іони	18.1	70.8	9.7	1.4	1.67 (2011)	2.33 (2013)
Сульфат-іони	73.3	26.7	0.00	0.00	1.00 (2022)	1.83 (2017)
Фосфат-іони	44.4	52.1	2.1	1.4	1.17 (2017)	2.25 (2012)
Хлорид-іони	100.0	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
Азот загальний	32,4	65,1	2.3	0.1	1,73 (2019)	2,09 (2023)



Рис. 6. Інтегральний клас якості води р.Тетерів за (2010 – 2025 рр.)

Рис. 7. Класи якості води за показниками азот-загальний та амонійний мг/дм³

За показником БСК₅ клас якості води коливався від 3,00 (2011 р.) до 3,36 (2016 р.). В загальному 96,3% аналізованих значень відповідали 3 класу якості (задовільна, слабо забруднена вода, БСК₅ у межах 2,0–4,0 мгО₂/дм³) та 3,7% – 4 класу (більше 4,0 мгО₂/дм³), що свідчить про стабільне органічне навантаження на водойму протягом усього аналізованого періоду., (рис. 8).

За вмістом розчиненого кисню 85,9% (рис. 9), значень на рівні більше 9,0 мгО₂/дм³ відповідали 1 класу якості (відмінна, дуже чиста вода), 14,1% – 2 класу (6,0 – 9,0 мгО₂/дм³). Виходів у 3 або 4 клас не зафіксовано. Найкращі значення спостерігались у 2019 та 2025 рр. (100% вимірювань – 1 клас).

За вмістом завислих речовин (рис. 8), клас якості коливався від 1,42 (2015 р.) до 2,00 (2018 р.). В цілому 17,8% значень відповідали 1 класу (до 5 мг/дм³) та 82,2% – 2 класу (5 – 15 мг/дм³). Виходів у 3 або 4 клас не зафіксовано, що свідчить про задовільний стан водотоку за каламутністю.

Вміст амоній-іонів (рис. 7), зумовив варіювання класу якості від 1,64 (2016 р.) до 2,33 (2018 р.). За цим показником 10,4% значень відповідали 1 класу (до 0,2 мг/дм³), 75,7% – 2 класу (0,2 – 0,5 мг/дм³) та 13,9% – 3 класу (0,5 – 1,5 мг/дм³). Перевищень 4 класу не виявлено.

Вміст нітрат-іонів (рис. 9), забезпечував найкращу якість води серед усіх досліджуваних показників: 97,2% значень відповідали 1 класу (до 5 мг/дм³) та лише 2,8% – 2 класу (5 – 20 мг/дм³), що вказує на відсутність суттєвого нітратного забруднення водозабору. За вмістом нітрит-іонів клас якості змінювався від 1,67 (2011 р.) до 2,33 (2013 р.). В цілому 18,1% значень відповідали 1 класу, 70,8% – 2 класу (0,01–0,05 мг/дм³), 9,7% – 3 класу (0,05–0,10 мг/дм³) та 1,4% – 4 класу (більше 0,10 мг/дм³).

За вмістом сульфат-іонів 73,3% (рис. 10) значень відповідали 1 класу (до 50 мг/дм³), а 26,7% – 2 класу (50 – 150 мг/дм³); найкращий середній клас спостерігався у 2022 р. (1,00), найгірший – у 2017 р. (1,83). За вмістом хлорид-іонів 100% значень протягом усього аналізованого періоду відповідали 1 класу якості (до 50 мг/дм³), що свідчить про мінімальне хлоридне забруднення водозабору., (рис. 11).

Вміст фосфат-іонів (рис 11) обумовив значення класу якості від 1,17 (2017 р.) до 2,25 (2012 р.). В цілому 44,4% значень відповідали 1 класу, 52,1% – 2 класу (0,05 – 0,15 мг/дм³), 2,1% – 3 класу (0,15 – 0,30 мг/дм³) та 1,4% – 4 класу. Аномальне значення 4 класу зафіксовано у травні 2012 р. (0,91 мг/дм³).

Отримані результати узгоджуються з даними екологічного оцінювання поверхневих вод Житомирського Полісся [12], що підтверджує характерність виявлених закономірностей для водних об'єктів регіону. Слід зазначити, що значення інтегрального класу у 2025 р. є найгіршим за весь аналізований період, що відображає загальну тенденцію до поступового погіршення якості води в останні роки та потребує посиленого моніторингу.

Висновки. Аналіз динаміки гідрохімічних показників р. Тетерів у створі питного водозабору м. Житомир за 2010 – 2025 рр. показав, що вміст розчиненого кисню протягом усього аналізованого періоду залишався на достатньому рівні (середні значення 9,63 – 12,65 мгО₂/дм³), однак в окремі роки мінімальні значення наближалися до критичної межі – зокрема, у 2023 р. зафіксовано зниження до 4,28 мгО₂/дм³, що свідчить про епізодичний дефіцит кисню в літню межу.

Показник БСК₅ протягом усього досліджуваного періоду стабільно перебував на рівні або вище нормативного значення ГДК (3,0 мгО₂/дм³) – середні значення коливалися в межах 2,35 – 3,11 мгО₂/дм³,

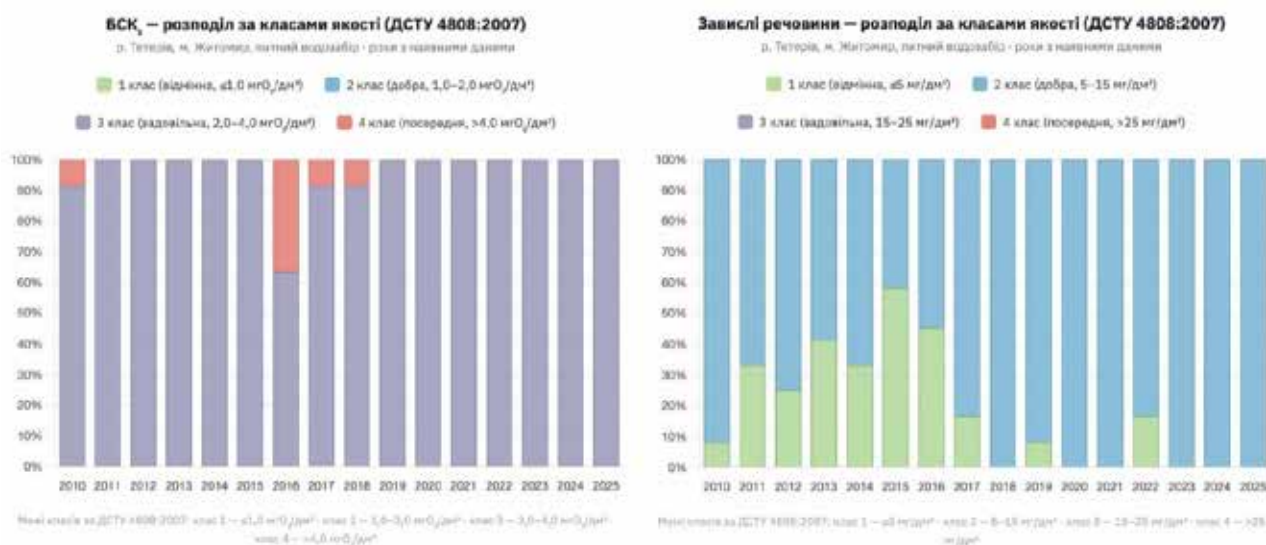
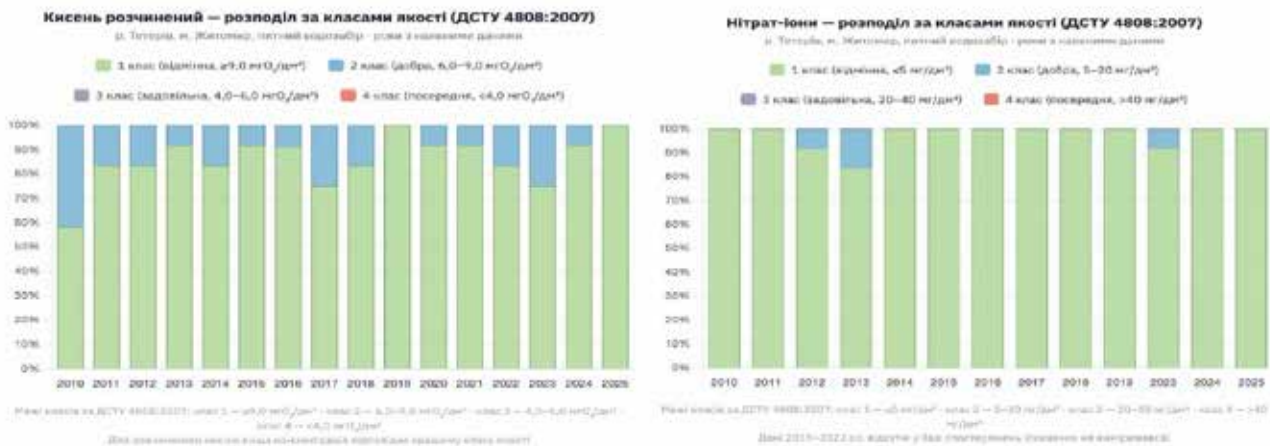
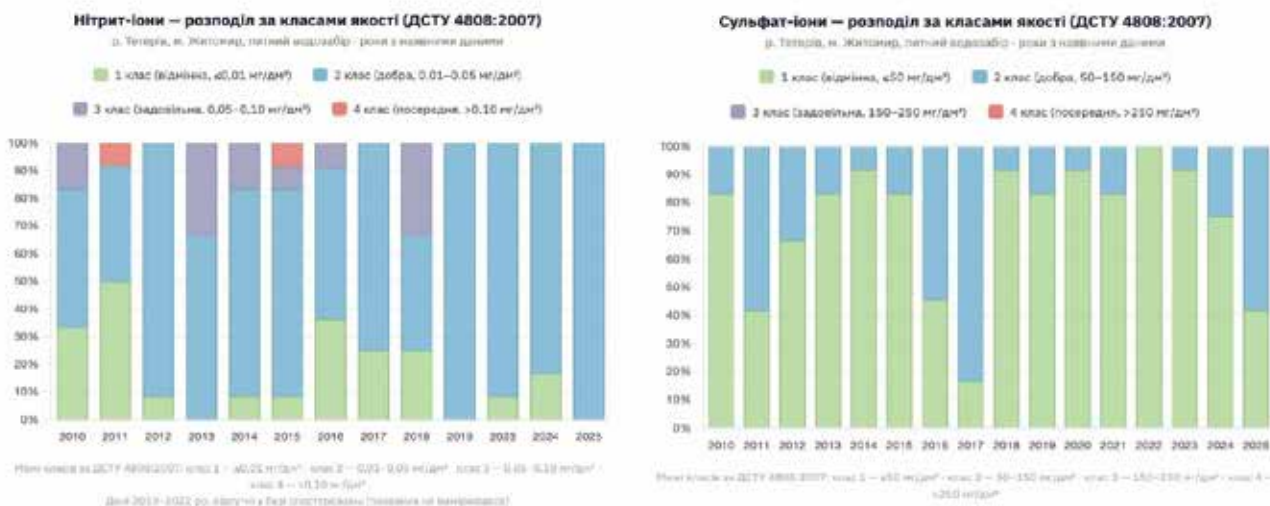


Рис. 8. Класи якості води за показниками БСК₅ та завислих речовин мг/дм³

Рис. 9. Класи якості води за показниками кисень розчинний та нітрат-іони мг/дм³Рис. 10. Класи якості води за показниками нітрит-іони та сульфат-іони мг/дм³

а максимальні разові концентрації у 2010 та 2013 рр. сягали 5,20 та 8,80 мгО₂/дм³ відповідно, що вказує на стабільне органічне навантаження на водойму.

Виявлено виражену тенденцію до зростання концентрації амоній-іонів після 2019 р.: якщо у 2010 – 2018 рр. середні значення не перевищували ГДК (0,5 мг/дм³), то у 2021 р. зафіксовано пік забруднення – 0,86 мг/дм³ (1,7 ГДК) з максимальною разовою концентрацією 1,74 мг/дм³. У 2023 – 2025 рр. показник стабілізувався на рівні 0,55 – 0,73 мг/дм³, однак залишається вище допустимого значення, що потребує постійного контролю.

Вміст нітрат- та нітрит-іонів протягом усього аналізованого періоду не перевищував нормативних значень ГДК. Переважання амонійного азоту над нітратним підтверджує домінування процесів амоніфікації над нітрифікацією, характерне для умов підвищеного органічного навантаження та епізодичного дефіциту кисню. Вміст фосфат-іонів у більшо-

сті років знаходився в межах допустимих значень, проте у 2012 – 2013 рр. середні значення перевищували ГДК у 1,4 – 1,6 раза, а разова максимальна концентрація у травні 2012 р. становила 0,91 мг/дм³ (9,1 ГДК), що пов'язано з інтенсивним поверхневим змивом мінеральних добрив.

Показники мінерального складу – сульфат-іони (35,45 – 58,58 мг/дм³ при ГДК 100 мг/дм³), хлорид-іони (23,09 – 32,44 мг/дм³ при ГДК 300 мг/дм³) та завислі речовини (5,23 – 7,16 мг/дм³ при ГДК 15 мг/дм³) – протягом усього аналізованого періоду стабільно залишалися в межах нормативних значень, що є типовим для маломінералізованих прісних вод Полісся.

За результатами оцінювання якості води відповідно до ДСТУ 4808:2007 встановлено, що інтегральний клас якості води р. Тетерів протягом 2010 – 2025 рр. стабільно відповідав 2 класу («добра», чиста вода прийнятної якості) і коливався в діапазоні від

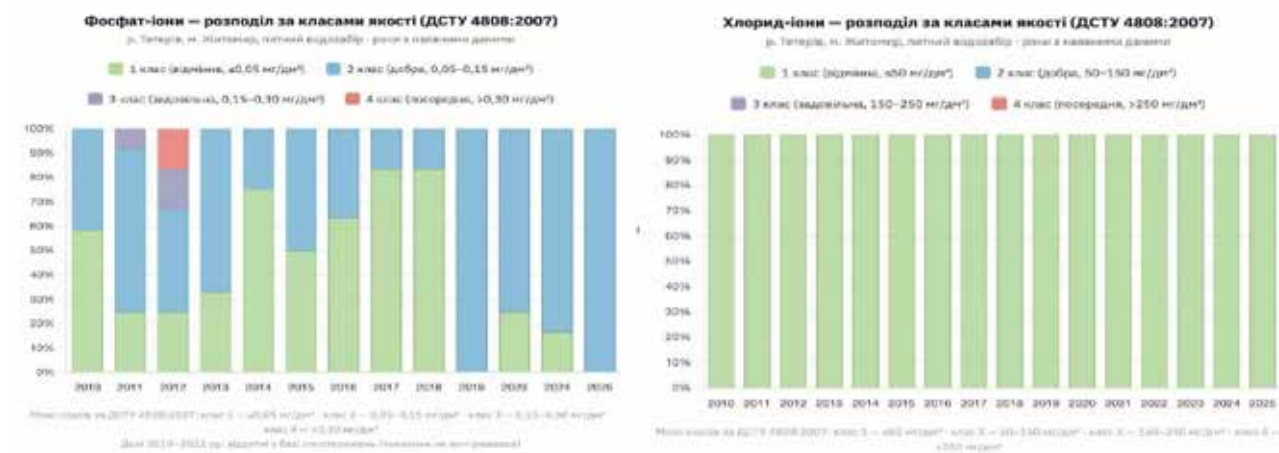


Рис. 11. Класи якості води за показниками фосфат-іони та хлорид-іони мг/дм³

1,58 (2014 – 2015 рр.) до 1,73 (2025 р.). Найкращий стан водозабору зафіксовано у 2014 – 2015 рр., найгірший – у 2025 р., що відображає загальну тенденцію до поступового погіршення якості води в останні роки.

За окремими показниками встановлено суттєві відмінності у класах якості: БСК₅ протягом усього періоду відповідав переважно 3 класу (96,3% значень) та 4 класу (3,7%), тоді як розчинений кисень демонстрував найкращі результати – 85,9% значень відповідали 1 класу. Хлорид-іони протягом усього аналізованого періоду стабільно відповідали 1 класу якості (100% значень).

Основними чинниками формування якості води р. Тетерів є поєднання абіотичних факторів (гідрологічний та температурний режим, кількість атмосферних опадів) та антропогенного навантаження: надходження забруднювальних речовин із поверхневим стоком з урбанізованої території м. Житомир, скид недостатньо очищених комунально-побутових стічних вод та дифузне забруднення з сільськогосподарських угідь. Відповідно до вимог ДСТУ 4808:2007, вода р. Тетерів у створі питного водозабору може

використовуватися для централізованого питного водопостачання із застосуванням стандартної схеми очищення, однак виявлені тенденції до зростання вмісту амоній-іонів та органічного забруднення потребують постійного моніторингу та вжиття відповідних водоохоронних заходів.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати можуть бути використані: органами Державного агентства водних ресурсів України для коригування програм моніторингу р. Тетерів з урахуванням виявлених тенденцій зростання азотного забруднення; підприємствами водопостачання м. Житомир для обґрунтування необхідності посилення контролю за амоній-іонами та БСК₅ у технологічному процесі водопідготовки; органами місцевого самоврядування для розробки водоохоронних заходів у басейні р. Тетерів, спрямованих на зниження скидів недостатньо очищених стічних вод; науковою спільнотою як база даних для подальших досліджень стану водних екосистем Житомирського Полісся та прогнозування змін якості питної води в умовах кліматичних змін.

Література

- Didovets I., Lobanova A., Bronstert A., Snizhko S., Maule C.F., Krysanova V. Assessment of climate change impacts on water resources in three representative Ukrainian catchments using eco-hydrological modelling. *Water*. 2017. Vol. 9, № 3. P. 204. DOI: <https://doi.org/10.3390/w9030204>
- Кірейцева Г.В., Циганенко-Дзюбенко І.Ю., Герасимчук О.Л., Скиба Г.В., Хоменко С.В. GAP-аналіз водокористування у контексті запобігання евтрофікації річки Тетерів в межах урбоєкосистеми м. Житомира. *Екологічні науки*. 2024. № 4 (55). URL: https://eco.j.dea.kiev.ua/archives/2024/4/55_2024.pdf
- Скиба Г.В., Кірейцева Г.В., Герасимчук О.Л., Циганенко-Дзюбенко І.Ю., Хоменко С.В. Визначення та прогнозування вмісту есенціальних важких металів у поверхневих водах урбанізованих ділянок річки Тетерів (Житомир). *Слобожанський науковий вісник. Серія: Природничі науки*. 2024. № 2. С. 50–57. URL: <https://journals.spu.sumy.ua/index.php/natural/article/view/461>
- Шевчук Л.В., Василева Л.О., Билина Л.В., Герасимчук О.Л. Геосистема річки Тетерів: комплексна характеристика. *Слобожанський науковий вісник. Серія: Природничі науки*. 2025. Вип. 1. URL: <https://eztur.ztu.edu.ua/handle/123456789/8948>
- Хільчевський В.К., Осадчий В.І., Курило С.М. Основи гідрохімії: підручник. Київ: Ніка-Центр, 2012. 312 с.
- Хільчевський В.К., Осадчий В.І., Курило С.М. Регіональна гідрохімія України: підручник. Київ: ВПЦ «Київський університет», 2019. 343 с.

7. Басейнове управління водних ресурсів річки Прип'ять. Державний моніторинг поверхневих вод. URL: <https://buvrzt.gov.ua/monitoring.html> (дата звернення: 09.03.2026).
8. Державне агентство водних ресурсів України. Моніторинг поверхневих вод. URL: <https://www.davr.gov.ua/monitoring-poverhnevih-vod1> (дата звернення: 09.03.2026).
9. Постанова Кабінету Міністрів України «Про затвердження Порядку здійснення державного моніторингу вод» від 19 вересня 2018 р. № 758.
10. Наказ Міністерства охорони здоров'я України «Про затвердження Гігієнічних нормативів якості води водних об'єктів для задоволення питних, господарсько-побутових та інших потреб населення» від 02.05.2022 № 721.
11. ДСТУ 4808:2007. Джерела централізованого питного водопостачання. Гігієнічні та екологічні вимоги щодо якості води і правила вибирання. Київ: Видавництво стандартів, 2007. 42 с.
12. Салій П.М., Гопчак І.В., Басюк Т.О. Екологічна оцінка якості поверхневих вод Житомирського Полісся. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2021. № 2 (60). С. 41–48.
13. Колісник А.В., Юрасов С.Н. Недоліки класифікації якості вод за ДСТУ 4808:2007 та шляхи їх усунення. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2014. № 14. С. 155–163. URL: <http://uhmj.odeku.edu.ua/wp-content/uploads/2014/10/20.pdf>

Дата першого надходження статті до видання: 24.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

ЕКОЛОГІЧНІ ТА ТОКСИКОЛОГІЧНІ ЧИННИКИ ПЕРЕХОДУ МІЖ САПРОБНИМИ ЗОНАМИ (НА ПРИКЛАДІ ОКРЕМИХ ВОДНИХ ДІЛЯНОК БАСЕЙНУ СІВЕРСЬКОГО ДІНЦЯ)

Божко Т.В.

Регіональний офіс водних ресурсів у Харківській області
вул. Космічна, 21, 61165, м. Харків
tbozko082@gmail.com

Досліджено екологічний стан окремих водних ділянок басейну Сіверського Донця з метою виявлення мікробіотично-індикаторних механізмів переходу між оліготрофною, мезосапробною та полісапробною зонами. Оцінювання якості води здійснювали на основі комплексного підходу, що поєднує гідрохімічні, гідробіологічні, мікробіологічні та еколого-токсикологічні показники. Встановлено, що ділянка р. Уди нижче місця скиду зворотних вод характеризується високим органічним і мікробіологічним навантаженням, низькими значеннями індексу Шеннона та індексу самоочищення, підвищеною хронічною токсичністю і належить до мезо-полісапробної зони. Для цієї ділянки виявлено пригнічення процесів природного самоочищення, домінування фекально-індикаторної мікрофлори та стійких до забруднення груп фітопланктону, що свідчить про стресовий стан екосистеми. У створі р. Сіверський Донець нижче впадіння р. Уди зафіксовано зниження рівня органічного забруднення, зростання біорізноманіття та відновлення балансу між амоніфікуючими і нітрифікуючими бактеріями. Водночас наявність хронічної токсичності за відсутності суттєвих гідрохімічних перевищень вказує на латентний характер забруднення і перехідний, екологічно нестійкий стан мезосапробної зони. Найбільш сприятливі умови встановлено на ділянці р. Уди вище м. Харків, де вода характеризується низьким рівнем органічного і мікробіологічного забруднення, відсутністю хронічної токсичності та ефективним функціонуванням процесів самоочищення, що відповідає олігосапробній зоні. Показано, що поєднання мікробіологічних індикаторів, індексів різноманіття та біотестування дозволяє виявляти приховані екотоксикологічні ризики і обґрунтовано оцінювати стійкість та потенціал самовідновлення річкових екосистем. *Ключові слова:* антропогенне навантаження; сапробність; самоочищення; індекс Шеннона; бактеріопланктон; хронічна токсичність; біоіндикація.

Ecological and Toxicological Factors of Transition Between Saprobic Zones (Case Study of Specific Water Segments in the Siversky Donets River Basin). Bozhko T.

The ecological state of specific water segments within the Siversky Donets River basin was investigated to identify microbiota-indicator mechanisms of transition between oligotrophic, mesosaprobic, and polysaprobic zones. Water quality assessment was performed using an integrated approach combining hydrochemical, hydrobiological, microbiological, and eco-toxicological parameters. It was established that the Udy River segment downstream of the wastewater discharge point is characterized by high organic and microbiological loads, low Shannon and self-purification indices, and increased chronic toxicity, classifying it as a meso-polysaprobic zone. This area exhibited inhibited natural self-purification processes, a dominance of fecal-indicator microflora, and pollution-tolerant phytoplankton groups, indicating a stressed ecosystem state. At the Siversky Donets monitoring station downstream of the Udy River confluence, a decrease in organic pollution, an increase in biodiversity, and a restored balance between ammonifying and nitrifying bacteria were recorded. However, the presence of chronic toxicity in the absence of significant hydrochemical exceedances indicates a latent nature of pollution and a transitional, ecologically unstable state of the mesosaprobic zone. The most favorable conditions were identified in the Udy River segment upstream of Kharkiv, where the water is characterized by low organic and microbiological pollution, the absence of chronic toxicity, and efficient self-purification processes, corresponding to an oligosaprobic zone. It is shown that the combination of microbiological indicators, diversity indices, and bio-testing allows for the detection of hidden eco-toxicological risks and provides a reasoned assessment of the stability and self-recovery potential of river ecosystems. *Key words:* Anthropogenic load; Saprobity; Self-purification; Shannon index; Bacterioplankton Chronic toxicity; Bioindication.

Актуальність проблеми. Антропогенні і кліматичні умови критично погіршують здатність річок до самоочищення. Додатковим дестабілізуючим фактором є наслідки бойових дій, що спричиняють хімічне та фізичне руйнування екосистем. У цих умовах вивчення мікробних спільнот як головних трансформаторів органічного вуглецю стає ключовим для розуміння процесів деградації та відновлення річок. Самоочищення і відновлення природних водних об'єктів, ще сукупність великої кількості чинників, і перш за все, біологічних процесів, засно-

ваних на життєдіяльності гідробіонтів. І не завжди одиничні фактори контролю, як хімічні або фізичні показники забруднення, можуть достовірно оцінити його ступень або чистоту водного об'єкту. Тому важливим є вивчення стану і поведінкових властивостей й взаємозв'язки окремих, чутливих біологічних чинників, які суттєво впливатимуть на зміни стану водойми і які відображають його скриту небезпеку.

Постановка задачі. Встановити екологічні і токсикологічні фактори переходу між сапробними зонами на прикладі окремо обраних ділянок аквато-



рії басейну Сіверського Донця, зокрема ролі латентної токсичності, функціональної структури водних мікроорганізмів та ефективності процесів самоочищення, за умов відповідності хімічних показників нормативам.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження спрямовані на розв'язання актуальних наукових і практичних завдань, пов'язаних з оцінкою екологічного стану окремо обраних ділянок басейну Сіверського Донця.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На якість води поверхневих водних об'єктів впливає комплекс природних і антропогенних чинників. До природних процесів належать ерозія ґрунтів та вивітрювання гірських порід, які зумовлюють надходження до водних об'єктів зважених речовин і мінеральних компонентів. Суттєвий вплив мають і сучасні кліматичні зміни: підвищення температури повітря та зростання інтенсивності випаровування призводять до зниження рівнів води в річках і пересихання малих водотоків і зменшення водного стоку (відповідно, й водних ресурсів), а з іншого боку, збільшення повідкового режиму річок, [1, 2, 3]. Найбільш вразливими до зміни клімату є водні екосистеми. Ці фактори істотно погіршують самоочисну здатність водних об'єктів, сприяють збільшенню концентрації забруднювальних речовин, розвитку евтрофікаційних процесів («цвітінню» води) та виникненню дефіциту розчиненого кисню, що негативно позначається на стані іхтіофауни та інших гідробіонтів [4]. Водночас антропогенна діяльність, зокрема промислова та сільськогосподарська, є одним із визначальних чинників погіршення якості поверхневих вод і деградації водних екосистем. Надходження біогенних елементів, органічних речовин і токсикантів зі стічними водами призводить до порушення трофічної структури екосистем і зростання екотоксикологічного ризику [5, 6]. Скид комунально-побутових та виробничих стічних вод, зокрема недостатньо очищених або неочищених, чинить значний негативний вплив на хімічний склад води та функціонування аквабіоценозів [7, 8, 9]. За даними Державного агентства водних ресурсів України відсоток неочищених стічних вод у країні складає 12,5 відсотків від загального обсягу скинутих зворотних вод. У Сіверський Донець, у межах Харківської області, було скинуто 194,9 млн. м³ стічних вод, з них 2 відсотки неочищених [10].

Окрему загрозу для водних екосистем становить вплив бойових дій. В останні роки значна частина акваторій річок у прифронтових районах зазнає комплексного негативного впливу, пов'язаного з фізичним руйнуванням русел і гідротехнічних споруд, хімічним забрудненням продуктами вибухів і паливно-мастильними матеріалами, а також біологічними порушеннями структури водних біоценозів [11, 12, 13]. Водні бактеріальні спільноти

мають велику роль у трансформації та мінералізації органічного вуглецю в річкових екосистемах. Їхня метаболічна активність залежить від концентрації доступного органічного субстрату, біогенних елементів, вмісту розчиненого кисню, температури води та інших фізико-хімічних чинників. Бактерії-індикатори, що використовують для санітарно-показкового контролю, належать переважно до родини *Enterobacteriaceae*, природним середовищем існування яких є кишечник теплокровних організмів. Їхню присутність у водному середовищі розглядають як ознаку фекального забруднення. Водночас представники цієї групи здатні брати участь у процесах розкладання органічної речовини у водоймах і, за масового розвитку, конкурувати з автохтонною мікробною спільнотою за поживні ресурси. Особлива небезпека бактерій цієї групи полягає у потенційному ризику для здоров'я людини. Невелика різниця у співвідношенні між автохтонною та індикаторною мікрофлорою вказує на незадовільний санітарний стан водойми та, дуже низьку ефективність процесів природного самоочищення [14]. За відсутності змін у режимі скидів забруднених вод у подальшому можливе переформування бактеріальної спільноти та стимулювання розвитку ціанобактерій, що призводить до евтрофікації водного об'єкта. Відомо, що ціанобактерії здатні продукувати вторинні метаболіти, які, за даними багатьох авторів [15, 16, 17], є потужними гепатотоксинами і можуть спричиняти генотоксичні та потенційно канцерогенні ефекти. Водночас через низьку поживну цінність ціанобактерій, як правило, не чинять прямої токсичної дії на зоопланктон, що підтверджується результатами експериментальних досліджень [18]. Разом зі стічними водами до поверхневих водних об'єктів потрапляють токсичні сполуки, зокрема важкі метали, пестициди, фталати, хлорбензоли, феноли та мікропластик, які дуже негативно впливають на фізіологію біопланктону [19]. Більшість із них належить до пріоритетних забруднювачів, що характеризуються низькою швидкістю розкладання та здатністю до біоаккумуляції. Попри те, що ці речовини рідко підлягають регулярному моніторингу, навіть у мікроконцентраціях вони виявляють токсичність та зумовлюють синергетичний ефект. У результаті вода набуває властивостей хронічної токсичності щодо річкової біоти, що пригнічує процеси природного самоочищення та відновлення екосистем. Для комплексної характеристики стану водного об'єкта необхідно додатково застосовувати еколого-токсикологічну оцінку [20]. Проте оцінювання екологічного стану лише за показником токсичності може не дати точної оцінки. Так, науковими дослідженнями показано, що навіть у разі невеликого забруднення річної води не виявлялася хронічна летальність і навпаки спостерігалася стимуляція розвитку та розмноження *D. magna*, що пов'язують зі стимулюючою дією помірних доз стресових факторів. [21]. Сукупна дія цих факторів

впливає на якість води та стійкість екосистем водних об'єктів.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. У статті розглядаються питання узгодженості (кореляції) мікробіотичних індикаторів із показниками хронічної токсичності і гідрохімічними показниками в перехідних зонах сапробності, які поки ще не достатньо вивчені.

Новизна. Хронічна токсичність для дафній розглядається як інтегральний показник сумарної та синергетичної дії забруднювачів. За умов, коли санітарно-гігієнічні показники води відповідають нормативам, але результати біотестування свідчать про наявність хронічної токсичності, це інтерпретується як ознака латентного екоотоксикологічного стресу, характерного для перехідного стану між мезо- та полісапробною зонами. Таким чином, дотримання ГДК регламентованих показників не виключає наявності сумарної токсичності, яка не завжди фіксується стандартним хімічним контролем, але виявляється за допомогою біоіндикації і бактеріологічних показників.

Методи досліджень: аналітичні, польові, хімічні, гідробіологічні, мікробіологічні, токсикологічні. Вимірювання гідрохімічних показників проводили згідно з чинними атестованими методиками. Гідробіологічні характеристики оцінювали за структурою *фітопланктону* методом стандартного мікроскопічного дослідження з використанням визначника «Водорості України...» (Царенко та ін., 2014). Для визначення *зоопланктону* використовували метод зоопланктонних сіток з наступним мікроскопіюванням. *Мікробіологічні показники* використовували для оцінки трофічного стану, санітарної безпеки та потенціалу самоочищення водойми. *Загальне мікробне число (ЗМЧ)* – чисельність автохтонних (аборигенних) та алохтонних (внесених переважно зі стічними водами) сапрофітних бактерій – визначали шляхом інкубації за температури 22 °C та 37 °C відповідно. *Санітарно-показові мікроорганізми* – вміст бактерій групи кишкової палички (загальних коліформ) та умовно-патогенні мікроорганізми визначали методом мембранної фільтрації з подальшою ідентифікацією на селективних середовищах. Чисельність еколого-трофічної групи: *азоттрансформувальних бактерій* визначали методом граничних розведень на рідких елективних середовищах для: амоніфікаторів – на пептонній воді (з контролем за реактивом Несслера); нітрифікаторів – на середовищі Виноградського (реактив Грісса); денітрифікаторів – на середовищі Гільтая в анаеробних умовах. *Токсичність* визначали експериментальним методом біотестування за КНД 211.1.4.056-97 через вплив зразків води на життєдіяльність тест об'єкту – ракоподібних *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg. Екологічну оцінку якості поверхневих вод за ступенем трофності та сапробності

проводили згідно з методикою В. Д. Романенка та ін. (1998). Індекс сапробності визначали за інтегральним значенням індексу «S», розрахованого для сукупності фітопланктону. Оцінку сапробності за Пантле–Буком розраховували як зважене середнє сапробних чисел усіх виявлених таксонів фітопланктону з урахуванням їх долі в угрупованні.

Відбір проб здійснювали з річки Уди і Сіверського Донця. Пункти спостереження (відбору) були розташовані – нижче місця скиду зворотних вод, вище м. Харкова і нижче впадіння р. Уди в Сіверський Донець (с. Есхар). Акваторія відноситься до категорії водних об'єктів господарсько-побутового призначення. Проби води відбирали в осінній період за температури води (18 – 20) °C.

Основні дослідження. Гідрохімічні дослідження. У ході дослідження якості води поверхневих водних об'єктах був проведений аналіз їхнього стану за основними показниками гідрохімічного складу. Результати вимірювання надані у таблиці 1.

Результати аналізу гідрохімічних показників на ділянці р. Уди нижче місця скиду зворотних вод свідчать про перевищення гігієнічних нормативів якості води для водойм категорії господарсько-побутового водокористування [22] за показниками органічного забруднення: хімічного споживання кисню (ХСК) – у 1,6 разів та біохімічного споживання кисню за 5 діб (БСК₅) – у 4 рази. Також зафіксовано перевищення нормативних значень за вмістом біогенних елементів – амонійного азоту та фосфатів – відповідно у 1,6 та 2,4 рази. Крім того, на цій ділянці відзначено підвищений вміст завислих речовин і знижена концентрація розчиненого кисню, що в сукупності свідчить про наявність інтенсивного джерела органічного забруднення. За сукупністю гідрохімічних показників поверхневий водний об'єкт на р. Уди нижче місця скиду зворотних вод може бути віднесений до категорії «забруднений». Показники складу та властивості води на ділянці р. Сіверський Донець нижче впадіння р. Уди (с. Есхар) в основному відповідали нормативам якості води для поверхневих водних об'єктів господарсько-побутового водокористування. Лімітуючим показником було БСК₅, перевищення якого склало – в 1,7 разів і зовсім невелике перевищення за ХСК – у 1,16 разів. За гідрохімічними характеристиками стан води на цій ділянці може бути охарактеризований як «слабо забруднений» з оцінкою «задовільна». На ділянці р. Уди вище м. Харкова зафіксовано незначно перевищення нормативних значень для показника БСК₅ – у 1,04 рази (у межах похибки вимірювання), тоді як інші гідрохімічні показники відповідали нормативним вимогам. За гідрохімічними характеристиками стан води на цій ділянці також може бути охарактеризований також як «слабо забруднений» з оцінкою «задовільна».

Гідробіологічні дослідження. Фіто- та зоопланктон визначали за таксоном, родиною або родом. Для всіх кількісних проб розраховували індекс Шенона

Таблиця 1

Характеристика водних об'єктів за гідрохімічними показниками

Гідрохімічні показники	р. Уди нижче місця скиду зворотних вод	р. Сів. Донець, нижче впадіння р. Уди (с. Есхар)	р. Уди вище м. Харків	Гігієнічні вимоги і ГДК в поверхневому водному об'єкті [22]
рН, од рН	7,05	7,52	8,08	6,5 – 8,5
Завислі речовини, мг/дм ³	152	36	7,56	Не повинно збільшуватись більш ніж на 0,75
O ₂ , мг/дм ³	3,22	6,85	7,77	Не менше 4,0 мг/дм ³
БСК ₅ , мгО ₂ /дм ³	12,0	5,2	3,1	3,0
ХСК, мгО/дм ³	48	35,0	24	30,0
Азот амонійний (N-NH ₄), мг/дм ³	3,25	1,95	0,35	2,0
Нітрити (NO ⁻²), мг/дм ³	0,07	0,12	0,071	1,22
Нітрати (NO ⁻³), мг/дм ³	23,46	26,0	3,31	45,0
Фосфати (PO ₄ ⁻³), мг/дм ³	8,51	2,52	1,17	3,5

(різноманіття). Результати дослідження фітопланктону на ділянці р. Уди нижче місця скиду зворотних вод показали суттєво низький кількісний та якісний видовий склад фітопланктону. Переважаючими формами водоростей були синьо-зелені (*Cyanophyta* sp.), які зазвичай, мають бурхливий розвиток в умовах органічного навантаження водойми; за ранжируванням останні угрупування розподілялися наступним чином: жовто-зелені (*Xanthophyta* sp.), евгленові (*Euglenophyta* sp.), золотисті (*Chrysophyta* sp.). Дослідження зоопланктону в цієї пробі виявило дуже багато нематод, *Zoogloea*, простіших інфузорій (*Paramecium*); *Euglena viridi*, коловраток (*Philodina* sp., *Rotaria rotatoria*), *Brachionus rubens*); у невеликої кількості ракоподібні. Від загальної біомаси біопланктону відокремили складну фіпланктону, яка склала – 8,61 мг/л або 767,9 млн. кл/дм³. Індекс Шеннона за фітопланктоном дорівнював 1,3, що відповідає стану екосистеми – «стрес, забруднення» і IV класу якості води.

Ділянка р. Сів. Донець, нижче впадіння р. Уди (с. Есхар) характеризувалася більш різноманітним складом фіто- і зоопланктону. За фітопланктонним спектром домінували діатомово-хлорококовий комплекс (*Achnanthes* sp.), також *Euglenophyta* sp., зелені (*Chlorophyta* sp.), криптофітові (*Cryptophyta* sp.), синьо-зелені. Серед зоопланктону були виявлені нематоди і бделоїдні коловратки (більш 50 % за всіх організмів); інфузорії, прикріплені форми вортицел (*Vorticella convallaria*); форамініфери, коловратки, остракоди, ракоподібні. Загальна біомаса фітопланктону склала – 5,72 мг/л або 464,3 млн. кл/дм³.

На ділянці р. Уди вище м. Харків домінували водорості діатомові (*Bacillariophyta* sp.), *Chlorophyta* sp., і *Cryptophyta* sp., а також *Euglenophyta* sp.

дуже рідко *Xanthophyta* sp. Біомаса фітопланктону склала 4,84 мг/л, чисельність – 320,4 млн. кл/дм³. Зоопланктон був представлений ракоподібними *Daphnia magna*, коловратками *Bdelloidea* і *Vorticella convallaria*; *Nitzschia ampioxu*. Індекс Шеннона за фітопланктоном дорівнює 1,6, що відповідає стану екосистеми – «помірна деградація» і III клас якості води («задовільна»).

Мікробіологічні дослідження. Хемоавтотрофні бактерії, що розкладають сполуки азоту належать до автохтонної групи і беруть активну участь у процесах самоочищення водних об'єктів. Відносно сапрофітних бактерій вони мають незначну чисельність та їх розвиток можуть пригнічувати фекальні бактерії через їх швидкий темп зростання і конкуренцією за лімітуючі ресурси (розчинений кисень, амоній). Співвідношення нітрифікуючих бактерій до амоніфікуючих є індексом самоочищення (Is), який показує інтенсивність фази мінералізації до фази деструкції органічного азоту. Якщо Is < 0,1 – процеси самоочищення пригнічені; Is = 0,1 – спостерігається нестійке самоочищення (помірне забруднення); Is ≥ 1 – самоочищення активне, стан водойми досить стабільний [23].

У таблиці 2 наведено дані щодо чисельності бактеріопланктону та структури його угруповань у досліджуваному створі.

Аналіз результатів показав, що в зоні р. Уди нижче місця скиду зворотних вод було зафіксовано високі концентрації сапрофітних автохтонних бактерій, а також бактерій, які культивувалися за температури 37 °C, тобто представників індикаторної групи (санітарно-показових та умовно-патогенних). Чисельність угруповань становила відповідно 10⁶ та 10⁵ кл/мл. Такі показники свідчать про інтенсивне органічне забруднення води, що ство-

Таблиця 2

Склад бактеріопланктону на ділянках, які досліджувалися

Мікробіологічні показники	р. Уди нижче місця скиду зворотних вод	р. Сів. Донець, нижче впадіння р. Уди (с. Есхар)	р. Уди вище м. Харків
ЗМЧ автохтонних бактерій, кл/мл	8500000	440000	1380
ЗМЧ алохтонних бактерій, кл/мл	720000	18900	96
Загальні колі форми, кл/л	1800000	35000	5900
Амоніфікатори, кл/мл	500	430	100
Нітрифікатори, кл/мл	50	430	100
Денітрифікатори, кл/мл	750	750	80

рює сприятливий субстрат для масового розвитку мікроорганізмів, у тому числі, групи фекальних бактерій, індекс яких досяг $1,8 \cdot 10^6$ кл/л, що в 180 разів перевищує гігієнічні нормативи для господарсько-побутового і рекреаційного використання водного об'єкта [22]. Ідентифікація представників родини *Enterobacteriaceae* показала наявність у пробах води бактерій *Escherichia coli* ssp., *Citrobacter* ssp., *Enterobacter* ssp., *Proteus* ssp., що підтверджує фекальний характер забруднення та підвищений санітарно-епідеміологічний ризик. Визначення азот-трансформуючих бактерій показало, що в зоні скиду переважно відмічені амоніфікатори і денітрифікатори і дуже низький рівень нітрифікаторів. Активний метаболізм денітрифікаторів свідчить про наявність анаеробних умов. Великий розрив між амоніфікаторами та нітрифікаторами вказує на потужне «свіже» органічне забруднення. Також це сприяє накопиченню амонію у воді. Індекс самоочищення, який визначається спів відношенням нітрифікаторів до амоніфікаторів (0,1) дуже низький, це свідчить про гальмування природного самоочищення через велике органічне навантаження на цій ділянці. Ступень забруднення цього водного об'єкта за мікробіологічними показниками – «висока», а екологічний статус відповідає полісапробній зоні. У створі р. Сів. Донець, нижче впадіння р. Уди (с. Есхар) спостерігали зменшення сапрофітних бактерій – $4,4 \cdot 10^5$ кл/мл, але досить високі концентрації алохтонних форм – $1,89 \cdot 10^4$ кл/мл. Мікроскопіювання зразків води показало масовий розвиток нитчастих форм бактерій. Співвідношення бактерій трансформуючих азот також змінилося: чисельність нітрифікаторів (430 кл/мл) дорівнює кількості амоніфікаторів (430 кл/мл), що є ознакою збалансованості інтенсивного відновлення екосистеми (індекс самоочищення дорівнює 1). Високий показник денітрифікаторів (750 кл/мл) вказує на активне виведення азоту, що часто буває в придонних шарах. Активні реакції окиснення і відновлення сполук азоту, разом з високою щільністю сапрофітних бактерій свідчать за інтенсивні процеси самоочищення, хоча індекс загальних коліформ ($3,5 \cdot 10^4$ кл/л) не відповідає гігієнічним нормативам Українського законодавства

і перевищує показник у 3,5 рази. У цілому на другій ділянці відбувалися інтенсивні процеси окиснення органіки, хоча санітарно-мікробіологічні показники не відповідали нормативним значенням. За бактеріологічним показником ступень забруднення ділянки можна оцінити як «помірно забруднену», а за екологічним статусом віднести до спробної зони. Ділянк р. Уди вище м. Харків за мікробіологічними показниками була самою збалансованою. Санітарно-мікробіологічні показники знаходилися майже в межах норми. Численність аборигенних сапрофітних мікроорганізмів і азоттрансформуючих бактерій вказує на низький вміст органіки. Система перебувала у стані біологічної рівноваги. За бактеріологічним показником ступень забруднення ділянки можна оцінити як «допустиму», а екологічний статус за мікробіологічним показником віднести до олігосапробної зони.

Еколого-токсикологічні дослідження. Загальну інтегральну токсичність води на досліджуваних ділянках проводили за реакцією чутливих до забруднення дафній *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg. Оцінка базувалася на порівнянні показників у тест-об'єктах, що культивувалися у зразках води, що досліджувалася, з контрольними зразками у якості чистої води. Гостру токсичність визначали протягом 24 – 48 годин; хронічну токсичність – протягом сьомо діб. Тест-об'єкт *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg та контрольні зразки утримували в термостаті за температури $(25 \pm 2) ^\circ\text{C}$ із постійним моніторингом показників життєдіяльності, зокрема летальності, рухової активності, репродуктивної здатності та особливостей розвитку. Середні значення критеріїв досліджуваних тест-об'єктів і контрольних варіантів порівнювали за статистичним методом Ст'юдента. Рівень хронічної токсичності води визначали в умовних одиницях хронічної токсичності (OT_x). Для цього встановлювали мінімальну кратність розбавлення, за якої хронічна токсичність води не реєструвалася. Оцінювання рівнів хронічної токсичності води здійснювали відповідно до класифікаційної шкали, наведеною в чинних нормативно-методичних документах [24] (таблиці 3). Результати визначення хронічної токсичності зразків води надані в таблиці 4.

Аналіз результатів біотестування показав, що властивості води на всіх досліджуваних ділянках не мають гостру токсичність.

У пробах води, відібраних у зр. Уди вище м. Харкова, хронічна токсичність не була виявлена: рівень водного об'єкту становив 1, що відповідає I класу якості та характеризується як «чиста вода» (таблиця 4).

У пробах води, відібраних з р. Уди нижче місця скиду зворотних вод, плодючість дафній протягом семи діб зменшилась майже на 50 відсотків, що відповідає хронічній токсичності 4-го рівня і III класу якості; за ступенем забрудненості такі води відносяться до категорії «помірно забруднена». Отримані результати узгоджуються з даними гідрохімічних і мікробіологічних досліджень, а також зі станом фітопланктону досліджуваної ділянки. У тест-об'єкту, що культивували у пробах води, відібраних з р. Сів. Донець, нижче впадіння р. Уди (с. Есхар) спостерігалось затримка зростання на (20 – 25) %, що відповідає хронічній токсичності 2-го рівня і II класу якості за ступенем забрудненості та класифікується як «слабо забруднена». Такий висновок кореспондується з рівнем мікробіологічного забруднення цієї ділянки, тоді як гідрохімічні показники відповідали нормативним значенням, що свідчить про наявність латентної (прихованої) токсичності водного середовища.

Отримані результати демонструють різний екологічний стан окремих ділянок Сіверського Донця залежно від антропогенного навантаження і здатності водних екосистем до очищення. Посвідчення гідрохімічних, біоіндикаторних, бактеріологічних і токсикологічних показників дозволяє обґрунтовано оцінити ступінь деградації екосистем, їхню стійкість та потенціал самовідновлення в басейні Сіверського Донця.

Узагальнена оцінка якості річної води за трофо-сапробіологічними показниками надано в таблиці 5.

За результатами таблиці можна відмітити, що у найгіршому стані знаходилася ділянка р. Уди нижче місця скиду зворотних вод: усі блоки показників свідчать про значне антропогенне навантаження, спостерігається кумулятивний ефект забруднення. Низькі індекси Шеннона і самоочищення (Ks) свідчать про пригнічення видового різноманіття на фоні великої кількості бактерій (перевантаження індикаторними мікроорганізмами) і стійких до забруднення окремих видів водоростей і простіших. Високий рівень хронічної токсичності свідчить про наявність небезпечних хімічних речовин у воді. Можна припустити, що екосистема перебуває у стані стресу. Вода класифікується як «брудна» (IV клас, 6 категорія). Ділянка, що розташована при впадінні р. Уди в р. Сів. Донець (Есхар) характеризується кращою якістю води: майже витримані нормативи за гідрохімічними показниками, фіто- і зоопланктон більш різноманітний і активний, покращилися еколого-трофічні показники: збільшилися індекси Шеннона і самоочищення: спостерігається баланс між процесами деструкції та мінералізації органічної речовини. Але бактеріологічний стан залишається незадоволений і зберігається хронічна токсичність, рівень який відповідає II класу якості («слабо забруднена»), що свідчить за приховані джерела небезпеки. Вода класифікується, як «слабо забруднена», III Індекс сапробності ($S \approx 2,1$) дозволяє віднести водний об'єкт до β -мезосапробної зони, яку можна розглядати як перехідну стадію між деградацією, відновленням екосистеми і чистою зоною. Ділянка вище міста Харків характеризується найкращим екологічним станом серед досліджених.

Таблиця 3

Класифікація якості води за рівнями токсичності

Клас якості води	Ступінь забрудненості	Рівень хронічної токсичності, OT_x
I	чиста	1,0
II	слабо забруднена	1,1-2,0
III	помірно забруднена	2,1-4,0
IV	брудна	4,1-8,0
V	дуже брудна	більше 8,0

Таблиця 4

Показники хронічної токсичності водних об'єктів

Місце відбору проби	Рівень хронічної токсичності, OT_x	Клас якості і ступінь забрудненості
р. Уди нижче місця скиду зворотних вод	4,0 (без розбавлення)	III помірно забруднена
р. Сів. Донець, нижче впадіння р. Уди (с. Есхар)	2,0	II слабо забруднена
р. Уди вище м. Харків	1,0	I чиста

Таблиця 5

Узагальнена оцінка якості річної води трофо-сапробіологічними показниками

Показники контролю	Блок показників	Пункти спостереження		
		р. Уди нижче місця скиду зворотних вод	р. Сів. Донець, нижче впадіння р. Уди (с. Есхар)	р. Уди вище м. Харків
Гідрохімічні	Клас якості/категорія	IV клас /6	III клас/4	III клас/4
	Характеристика стану/оцінка якості	Брудна	Слабо забруднена/задовільна	Слабо забруднена/задовільна
Гідробіологічні	Індекс Шеннона (за фітопланктоном)	1,3	1,6	1,8
	стан екосистеми і клас якості	Стрес, забруднення і IV клас (забруднена)	Помірна деградація і III клас (задовільна)	Помірна деградація і III клас (задовільна)
Бактеріологічні	за ЗМЧ і санітарними поєднаннями	Ступень забруднення: «висока». Екологічний статус: полісапробна зона	Ступень забруднення: «помірно забруднена». Екологічний статус: мезосапробна зона	Ступень забруднення: «допустима». Екологічний статус: олігосапробна зона
	Індекс самоочищення за еколого-трофічними показниками (Ks)	0,1	1,0	1,0
Токсикологічні	рівень хронічної токсичності	4,0	2,0	1,0
	клас якості і ступінь забрудненості	III помірно забруднена	II слабо забруднена	I чиста
Індекс Шеннона	Індекс (H')	1,2	1,9	2,1
Індекс сапробності за Пантле–Буком	Індекс сапробності	мезосапробна – полісапробна (S ≈ 2,8)	β-мезосапробна (S ≈ 2,0)	олігосапробна – β-мезосапробна (S ≈ 1,6)
	Екологічний статус	Вода забруднена	Помірно забруднена, зона відновлення	Відносно чиста

Гідрохімічні показники відповідають III класу якості, а вода оцінюється як «слабо забруднена/задовільна». Індеси Шеннона (H') і самоочищення за еколого-токсичними показниками (Ks) свідчать про досить стабільну структуру біоти та рівень біорізноманіття, при чому з невеликою і збалансованою кількістю фіто- і зоопланктону. Санітарний стан за бактеріологічними показниками відповідає олігосапробній зоні, що свідчить про низький рівень органічного забруднення, а відсутність хронічної токсичності відповідає I класу якості (вода «чиста»). За індексом сапробності ділянка відповідає олігосапробної – β-мезосапробної зони з стабільною тенденцією до самоочищення.

Головні висновки. Отримані результати демонструють різний екологічний стан окремих ділянок Сіверського Донця залежно від антропогенного навантаження і здатності водних екосистем до очищення. Водний об'єкт, що перевантажений через забруднення органічного походження, формує стійку полісапробну зону з хронічною токсичністю, порушеним еколого-трофічним балансом

і контамінацією води бактеріями групи кишкової палички. Інтегральна оцінка, яка поєднує бактеріологічні та токсикологічні індикатори дозволяє виявити приховану деградацію екосистем навіть за умови відносного благополуччя за гідрохімічними і гідробіологічними характеристиками. Дослідження продемонстрували наявність чіткого градієнту від олігосапробного стану до полісапробного з частковою реабілітацією в основному руслі Сіверського Донця. Поєднання гідрохімічних, біоіндикаторних, бактеріологічних і токсикологічних показників дозволяє обґрунтовано оцінити ступінь деградації екосистем, їхню стійкість та потенціал самовідновлення в басейні Сіверського Донця.

Перспективи використання результатів дослідження. Перспективи використання результатів досліджень полягають у можливості розроблення комплексного підходу до діагностики стану річкових екосистем, що дозволить виявляти приховану деградацію аквабіоценозів та прогнозувати ризики втрати самоочисної здатності стратегічного водного ресурсу – басейну Сіверського Донця.»

Література

1. Аналіз впливу кліматичних змін на водні ресурси України (резюме дослідження) / за ред. С. С. Садогурської ; Центр екологічних ініціатив «Екодія». Київ, 2021. 32 с. URL: https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2021/06/analiz_vplyvu_klim_zmin_na_vodni_res_abs.pdf (дата звернення: 31.12.2025).
2. Climate change impact on water availability of main river basins in Ukraine / I. Didovets, V. Krysanova et al. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2020. Vol. 32. 100761. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100761>.
3. Жук В. М., Шамес Є. О. Вплив кліматичних умов та водогосподарських заходів на гідрологічний режим р. Сіверський Донець. *Сучасна наука: проблеми, перспективи, інновації* : матеріали міжнар. наук.-практ. конф. (м. Вінниця, 11–12 листоп. 2020 р.). Вінниця : Вінницький кооперативний інститут, 2020. С. 73–76.
4. Ромашенко М. І. Вплив сучасних кліматичних змін на водні ресурси та сільськогосподарське виробництво. *Меліорація і водне господарство*. 2020. № 1. С. 5–22. DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202001-235>.
5. Ali E. M., Khairy H. M. Environmental Assessment of Drainage Water Impacts on Water Quality and Eutrophication Level of Lake Idku, Египт. *Environmental Pollution*. 2016. Vol. 216. P. 437–449. URL: <https://www.researchgate.net/publication/304196161> (дата звернення: 31.12.2025).
6. Preliminary Assessment of Ecological Status of the Siversky Donets River Basin (Ukraine) Based on Phytoplankton Parameters and Its Verification by Other Biological Data / O. Bilous et al. *Water*. 2021. Vol. 13, iss. 23. 3368. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13233368>.
7. Крайнюков О. Н. Современное экологическое состояние водных объектов бассейна реки Северский Донец. *Человек и окружающая среда. Вопросы неоекологии*. 2015. № 3-4 (24). С. 71–77. URL: <https://periodicals.karazin.ua/humanenviron/article/view/5558> (дата звернення: 31.12.2025).
8. Лобода Н. С., Смалий О. В. Роль притоков в Донбассе в обеспечении качества поверхностных вод реки Северский Донец. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2019. № 24. С. 56–66. DOI: <https://doi.org/10.31481/uhmj.24.2019.06>.
9. Courcoul C. The sensitivity of aquatic microbial communities to a complex agricultural contaminant depends on previous drought conditions. *Water Research*. 2022. Vol. 217. 118396. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118396>.
10. Екологічний паспорт Харківської області за 2024 рік / Харківська обласна військова адміністрація. Харків, 2024. URL: https://kharkivoda.gov.ua/content/documents/1327/132692/Attaches/ekologichniy_pasport_2024_rik.pdf (дата звернення: 31.12.2025).
11. Антропогенний вплив війни на водні ресурси: аналіз та потенційні шляхи відновлення / Г. Циганенко-Дзюбенко та ін. *Проблеми хімії та сталого розвитку*. 2024. Вип. 3. DOI: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2024-3-7>.
12. Божко Т.В., Ігнатенко М.Я. Стан річки Сіверський Донець та шляхи його покращення. Вплив воєнних дій на водні ресурси України. *Науково-практичний журнал Екологічні науки*. 2024. Вип. 55. Том 1.
13. Shumilova O. Impact of the Russia–Ukraine armed conflict on water resources and water infrastructure. *Nature Sustainability*. 2023. Vol. 6, iss. 5. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01068-x>.
14. Моніторинг самоочищення дельти Дунаю і річки Мерло за мікробіологічними показниками / І. В. Зінченко та ін. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2023. Вип. 39. С. 39–54. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2023-39-04>.
15. Christoffersen K. S., Kaas H., Bartram J. Toxic Cyanobacteria in Water. A Guide to Their Public Health Consequences, Monitoring, and Management by I. Chorus. *Limnology and Oceanography*. 2000. Vol. 45, iss. 5. DOI: <https://doi.org/10.2307/2670717>.
16. A review of the global ecology, genomics, and biogeography of the toxic cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* / M. J. Harke et al. *Harmful Algae*. 2016. Vol. 54. P. 4–20. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hal.2015.12.007>.
17. State of knowledge and concerns on cyanobacterial blooms and cyanotoxins / S. Merel et al. *Environment International*. 2013. Vol. 59. P. 303–327. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.06.013>.
18. Toxic Cyanobacteria in Water: A guide to their public health consequences, monitoring and management / ed. by I. Chorus, J. Bartram. WHO, 1999. URL: <https://cdn.who.int/media/docs/default-source/wash-documents/water-safety-and-quality/toxic-cyanobacteria---1st-ed.pdf> (дата звернення: 31.12.2025).
19. Toxicological effects of nanoparticles on Plankton: implications for Environmental Health / E. Barbieri et al. *O Mundo Da Saúde*. 2025. Vol. 49. DOI: <https://doi.org/10.15343/0104-7809.202549e18092025I>.
20. Крайнюков О. М., Крайнюкова А. М., Божко Т. В. Оцінка еколого-токсикологічного стану поверхневих вод Харківської області. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2010. № 2 (15). С. 74–82. URL: <https://files01.core.ac.uk/download/pdf/46588457.pdf> (дата звернення: 31.12.2025).
21. Karayutğ T. Combined evaluation of physicochemical parameters and *Daphnia magna* toxicity tests of Gediz River surface water. *Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 2025. Vol. 42, iss. 4. DOI: <https://doi.org/10.12714/egejfas.42.4.08>.
22. Гігієнічні нормативи якості води водних об'єктів для задоволення питних, господарсько-побутових та інших потреб населення : наказ МОЗ України від 02 трав. 2022 р. № 721. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0524-22> (дата звернення: 31.12.2025).
23. Методи гідроекологічних досліджень поверхневих вод / О. М. Арсан та ін. ; за ред. В. Д. Романенка ; НАН України, Ін-т гідробіології. Київ : ЛОГОС, 2006. 408 с.
24. Методика визначення рівнів токсичності поверхневих і зворотних вод для контролю відповідності їх якості встановленим нормативним вимогам / Мінекобезпеки України. Київ, 2000. 28 с.

Дата першого надходження статті до видання: 25.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ДО ОЦІНЮВАННЯ ВАРТІСНОЇ ЦІННОСТІ ЕКОСИСТЕМНИХ ПОСЛУГ ВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ

Васенко О.Г., Черба О.В.

Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем»

вул. Єніна Євгенія, 6, 61165, м. Харків

alexandr.vasenko@gmail.com, o.cherba@gmail.com

Зниження якості екосистемних послуг водних об'єктів внаслідок інтенсивної антропогенної діяльності та зміни клімату негативно впливає на якість життя та добробут населення. Забруднення вод, трансформація природних ландшафтів і руйнування середовищ існування видів призводять до деградації водних екосистем та скорочення біологічного різноманіття, яке є основою їх стабільного функціонування. У зв'язку з цим особливого значення набуває розроблення методичного підходу до оцінювання екосистемних послуг, який дозволить поєднати екологічну та економічну складові та створить підґрунтя для прийняття ефективних управлінських рішень щодо охорони, відновлення та раціонального використання водних ресурсів.

У статті представлено комплексний підхід до оцінювання вартісної цінності біорізноманіття водних об'єктів, який ґрунтується на рекомендаціях Європейської економічної комісії ООН і сучасних міжнародних класифікаціях екосистемних послуг. Підхід передбачає поетапне виявлення відповідних екосистемних послуг і основних зацікавлених сторін, кількісне та грошове оцінювання біорізноманіття та розроблення пакету компенсаційних заходів. Сформовано систему екологічних і економічних індикаторів біорізноманіття, що характеризують різні аспекти природного капіталу і дозволяють враховувати екологічний стан водних об'єктів, просторову структуру екосистем, продуктивність біоресурсів. Визначено, що під час розроблення механізму формування платежів за екосистемні послуги доцільно використовувати інструменти і платіжні схеми, які враховують соціально-економічні умови регіону та витрати на ревіталізацію порушених екосистем.

Результати дослідження можуть бути використані у практиці державного управління водними ресурсами під час розроблення природоорієнтованих стратегій, екологічного планування та формування платежів за екосистемні послуги. Запропонований підхід сприяє формуванню економічних стимулів збереження біорізноманіття та впровадженню принципів сталого управління водними об'єктами в умовах зростання антропогенного впливу. *Ключові слова:* антропогенний вплив, біорізноманіття, вартісне оцінювання, водні ресурси, екосистемні послуги, комплексний підхід, прийняття управлінських рішень.

A comprehensive approach to assessing the monetary value of ecosystem services provided by water bodies. Vasenko O., Cherba O.

The decline in the quality of ecosystem services provided by water bodies, resulting from intensive anthropogenic activity and climate change, negatively impacts the quality of life and well-being of the population. Water pollution, the transformation of natural landscapes, and the destruction of species' habitats lead to the degradation of aquatic ecosystems and a reduction in biodiversity, which is the foundation of their stable functioning. In this context, the development of a methodological approach to assessing ecosystem services takes on particular importance, as it will allow for the integration of ecological and economic components and lay the groundwork for effective management decisions regarding the protection, restoration, and rational use of water resources.

This article presents a comprehensive approach to assessing the monetary value of the biodiversity of aquatic bodies, based on the recommendations of the United Nations Economic Commission for Europe and current international classifications of ecosystem services. The approach involves the step-by-step identification of relevant ecosystem services and key stakeholders, the quantitative and monetary valuation of biodiversity, and the development of a package of compensatory measures. A system of ecological and economic biodiversity indicators has been developed that characterizes various aspects of natural capital and allows for the consideration of the ecological condition of water bodies, the spatial structure of ecosystems, and the productivity of biological resources. It has been determined that when developing a mechanism for establishing payments for ecosystem services, it is advisable to use instruments and payment schemes that take into account the region's socio-economic conditions and the costs of revitalizing degraded ecosystems.

The research findings can be applied in the practice of state water resources management during developing nature-based strategies, conducting environmental planning, and establishing payments for ecosystem services. The proposed approach contributes to the creation of economic incentives for biodiversity conservation and the implementation of principles of sustainable water resources management in the context of increasing anthropogenic impact. *Key words:* anthropogenic impact, biodiversity, monetary valuation, water resources, ecosystem services, comprehensive approach, management decision-making.

Постановка проблеми. Деградація природних екосистем і зниження якості екосистемних послуг є однією з ключових екологічних проблем сучасності. Особливо вразливими є водні екосистеми, які забезпечують широкий спектр регулюючих, підтримувальних та культурних екосистемних послуг.

У першу чергу це стосується водно-болотних угідь, які є резерватами біорізноманіття.

Основними причинами зниження якості екосистемних послуг водних об'єктів є їх забруднення стічними водами промислового та сільсько-господарського комплексів, безсистемна господар-



ська діяльність та зміна клімату. Це призводить до замулення і заростання річок, зміни водного стоку і втрати біорізноманіття. Як наслідок – зниження здатності до самоочищення, дефіцит водних ресурсів та зменшення запасів питної води.

Наразі більшість водних об'єктів перебуває у незадовільному стані і потребує відновлення шляхом обмеження неконтрольованого вторгнення людини в природу та розроблення компенсаційних заходів.

Відновлення природного стану екосистем є одним із глобальних пріоритетів, який має забезпечувати впевненість у тому, що екологічні послуги не буде втрачено.

Актуальність дослідження. Згідно з Законом України «Про основні засади (стратегію) державної екологічної політики до 2030 року» Україна має впровадити систему ефективного управління для забезпечення збалансованого користування природними ресурсами з урахуванням необхідності забезпечення ними майбутніх поколінь. Розвиток екосистемних послуг дасть змогу створити можливості для сталого розвитку суспільства та екосистем. Біологічне різноманіття України повинно бути збереженим, оціненим і відповідним чином відновленим [1].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження виконано в межах науково-дослідної роботи «Наукове обґрунтування переліку водних екосистем, які забезпечують основні екосистемні послуги, порядок здійснення оцінювання вартісної цінності їх біорізноманіття та розроблення рекомендацій щодо відновлення і збереження цих екосистем» [2], у рамках якої розроблено підхід до оцінювання вартісної цінності екосистемних послуг на підставі рекомендацій ЄЕК ООН.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Упродовж останніх десятиліть питання екосистемних послуг є предметом активного наукового обговорення як на національному рівні, так і в міжнародному контексті. До його опрацювання залучено державні органи, наукові установи, заклади вищої освіти та громадські організації.

Сучасний підхід до економічної інтерпретації екосистемних функцій пов'язується з працями Пола та Анни Ерліхів, Роберта Костанзи, Рудольфа де Гроота та інших дослідників, які розробили концепцію екосистемних послуг як вигод, що отримуються суспільством унаслідок функціонування природних систем. Подальший розвиток теорії та практики оцінювання екосистемних послуг відбувався у межах міжнародних ініціатив і проєктів (TEEB (The Economics of Ecosystems and Biodiversity), IPBES (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services), ESMERALDA (Enhancing ecoSystem Services Mapping for Policy and Decision Making)), а також у межах впровадження класифікації CICES (Common International Classification for Ecosystem Services), яка забезпе-

чила уніфікацію підходів до ідентифікації та групування послуг екосистем для кращого аналізу та управління.

У національному науковому середовищі питанням тлумачення поняття екосистемних послуг, їх ідентифікації та систематизації присвячено праці Балюка С.А., Александрової Т.Д., Садикова О.Ф., Пузаченко Ю.Р., Фадєєва А.І., Василюка О.В., Дегтярь Н.В., Мішеніна Є.В., Олійника Н.В., Бурковського О.П., Мірошніченка М.М. тощо. Значну кількість наукових досліджень присвячено концепції екосистемних послуг і розробленню методологічних засад екосистемного підходу в управлінні природними ресурсами (Гавадзин Н.О., Загвойська Л.Д., Сотник І.М., Горобченко Т.В.). На сьогоднішній день ґрунтовно розроблено економічні інструменти контролю, засновані на обліку втрат окремих видів екосистемних послуг і платежів за використання природних ресурсів і забруднення довкілля, що відображено у працях Дорогунцова С.І., Алімова А.Ф., Бистрякова І.К., Олійника Я.Б., Паламарчука М.І., Хвесика М.А., Ільїної М.В. тощо.

У роботі Варухи А. (2022) [3] розкрито теоретико-методологічні засади оцінки екосистемних послуг в умовах воєнного впливу, акцентовано увагу на складності їх монетизації, необхідності просторового картування та врахування екологічного стану екосистем. Автор наголошує на обмеженості існуючих індикаторів та високій чутливості наслідків оцінювання до якості вихідних даних, що є особливо актуальним для водних екосистем.

Практикоорієнтований підхід наведено у методичних рекомендаціях щодо оцінки вартості екосистемних послуг (2023) [4], який базується на прямій грошовій оцінці природних наземних і прісноводних екосистем із використанням ринкових та компенсаційних методів. Зазначені рекомендації базуються на міжнародних класифікаціях і передбачають застосування картографування екосистем, однак їх практична реалізація потребує розвинених баз даних і адаптації до регіональних особливостей функціонування екосистем.

Авторами [5] (2023) у межах проєкту «Разом за екологічну демократію, справедливість та верховенство права в Україні» розроблено методику розрахунку екосистемного добробуту, яка базується на оцінюванні різноманіття природних оселищ (біотопів). Дослідження спрямовано на оцінювання масштабів збитків, заподіяних Україні внаслідок повномасштабного вторгнення, через втрату екосистемами можливості надавати екосистемні послуги. Проте, вона має переважно агрегований характер і не передбачає безпосереднього визначення вартісної цінності біорізноманіття водних екосистем як самостійної екосистемної послуги.

У монографії Бойко Т.Г. (2024) [6] проаналізовано якість і повноту сучасного оцінювання екосистемних послуг. У роботі зазначено, що значна частина оці-

нок має описовий характер, не враховує просторову диференціацію та зворотні зв'язки між біорізноманіттю і потоками екосистемних послуг, що обмежує можливості використання таких результатів у процесах управління природними ресурсами.

Результати узагальнення масиву наукових джерел свідчать про нагальну потребу у розробленні практикоорієнтованого комплексного підходу до оцінювання екосистемних послуг водних об'єктів.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. На сьогоднішній день невирішеними залишаються проблеми вибору і поєднання екологічних і економічних індикаторів, урахування екологічного стану водних об'єктів, що зумовлює необхідність подальших досліджень у цьому напрямку.

Новизна. Розроблено комплексний підхід до оцінювання вартісної цінності біорізноманіття водних об'єктів як складової екосистемних послуг, що поєднує екологічні індикатори стану біоти з економічними методами оцінювання природного капіталу та враховує особливості їх функціонування.

Методологічне або загальнонаукове значення. Загальнонаукове значення дослідження полягає у вдосконаленні екосистемного підходу до оцінювання вартісної цінності екосистемних послуг шляхом інтеграції екологічних індикаторів стану водних об'єктів з інструментами економічного аналізу.

Виклад основного матеріалу. Найвищу вартісну цінність мають непорушені людиною природні екосистеми, які надають велику кількість екосистемних послуг. Основою ефективності та стійкості екосистем, у тому числі водних, є біорізноманіття. Чим воно більше, тим вищу продуктивність мають екосистеми, якісніше забезпечують екосистемні послуги і легше адаптуються до змін. У порушених екосистемах якість і спектр послуг, які вони здатні забезпечувати, суттєво знижуються.

Для практичного здійснення вартісного оцінювання екосистемних послуг виділено чотири основних етапи [2, 7]:

- I. Виявлення відповідних екосистемних послуг;
- II. Виявлення основних зацікавлених сторін;
- III. Оцінювання чистої віддачі від екосистемних послуг;
- IV. Аналіз і оцінювання розподілу витрат і благ серед основних зацікавлених сторін, розроблення пакету компенсаційних заходів.

В основу дослідження покладено підходи, запропоновані у [8, 9], що розроблені під егідою ЄЕК ООН.

I. Виявлення (ідентифікація) екосистемних послуг водних ресурсів.

Індикатори стану біорізноманіття водних ресурсів допомагають визначити зміни в якості й кількості води, динаміку біорізноманіття та вважаються важливою доказовою базою для прийняття рішень на усіх рівнях щодо якості екосистемних послуг.

Екосистемний підхід передбачає залучення широкого кола індикаторів – різноманіття видів і його стійкість, багатокомпонентні харчові ланцюги, ланцюги кругообігу поживних речовин тощо.

Найчастіше природне біорізноманіття розглядають з позиції виду як основної таксономічної одиниці. Так, різноманіття середовищ існування оцінюють з точки зору забезпечення умов для життєдіяльності видів. Генетичне різноманіття також оцінюють не стільки з позицій генетичного фонду, який може використовуватися людиною у виробництві, скільки для визначення стійкості існування виду. В економіці біологічні ресурси також розглядаються з позиції виду (наприклад, промислова цінність певних видів риби).

Тому головними індикаторами під час моніторингу біорізноманіття є видове різноманіття і видове багатство, які базуються на визначенні чисельності виду (популяції).

Найбільш придатним для оцінювання видового різноманіття водних об'єктів є індекс різноманіття Шеннона (H), який обчислюють як за чисельністю (в одиницях біт/екз), так і за біомасою (в одиницях біт/мг) гідробіонтів (фіто- і зоопланктону):

$$H = - \sum_{i=1}^S p_i \ln(p_i) \quad (1)$$

де S – загальна кількість видів;

p_i – частка i -го виду у вибірці.

Оптимальні показники індексу Шеннона для водних об'єктів перебувають у межах 2,0 – 3,5 біт/екз. Зниження індексу свідчить про спрощення структури біоценозу.

Індекс дозволяє порівнювати біорізноманіття різних екосистем, враховуючи не лише кількість видів, але і рівномірність їх розподілу.

Видове багатство визначається як відношення фактичного біорізноманіття (кількості видів на одиниці території (акваторії)) – до середнього біорізноманіття (середньої кількості видів, характерної для країни), і вимірюється у відсотках або одиницях.

У залежності від особливостей умов і задач під час оцінювання допускається застосування інших індикаторів, наприклад: критерій Сімпсона, екологічний та біологічний індекси якості вод, індекси своєрідності угруповань, цілісності та корисності біорізноманіття, інтегральна оцінка біорізноманіття як узагальненого показника негативного впливу стану довкілля на живі організми тощо [10, 11].

Оцінка різноманіття за критерієм Сімпсона (D) розраховується за формулою:

$$D = \frac{1}{\sum_{j=1}^n D_j^2} \quad (2)$$

де D_j – частка особин j -го виду у сумарному різноманітті біотопу, яке прийнято за одиницю;

n – загальна кількість видів.

Екологічний індекс якості вод (I_E) обчислюється як середньоарифметичне хімічного (I_x) та біологічного (I_b) індексів:

$$I_E = \frac{(I_x + I_b)}{2} \quad (3)$$

У свою чергу, екологічний індекс якості вод обчислюється для середніх і для найгірших значень категорій окремо: $I_{E \text{ серед.}}$ та $I_{E \text{ найгір.}}$

Біологічний індекс якості вод (I_b) визначається на основі узагальнення значень окремих блокових індексів:

$$I_{b \text{ серед.}} = \frac{(I_{zb \text{ серед.}} + I_{m \text{ серед.}} + I_{bx \text{ серед.}} + I_{bt \text{ серед.}})}{N} \quad (4)$$

де: $I_{zb \text{ серед.}}$ – індекс гідробіологічних показників;

$I_{m \text{ серед.}}$ – індекс мікробіологічних показників;

$I_{bx \text{ серед.}}$ – індекс показників біохімічних процесів;

$I_{bt \text{ серед.}}$ – індекс біотестових показників;

N – загальна кількість блоків біологічних показників, які розглядаються.

Середні значення групових індексів розраховуються як середньо-арифметичне значення суми категорій показників, що входять до відповідної групи. Наприклад, індекс гідробіологічних показників ($I_{zb \text{ серед.}}$) може визначатися за формулою [12]:

$$I_{zb \text{ серед.}} = \frac{(K_{y \text{ серед.}} + K_{f \text{ серед.}} + K_{bi \text{ серед.}})}{3} \quad (5)$$

де K_y серед – категорія за структурними показниками біотичних угруповань;

K_f серед* – категорія за показниками фітопланктону;

K_{bi} серед* – категорія за біоіндикаційними оцінками.

Загальні показники біорізноманіття пропонуються доповнювати системою індикаторів, які характеризують конкретні регіони, з метою визначення пріоритетів природоохоронної політики, екологічних умов і полегшення контролю.

Під час дослідження об'єктів оціночних робіт і проведення розрахунків природні ресурси доцільно диференціювати з урахуванням територіального, біологічного, соціального, історико-культурного та рекреаційного факторів – виділяти зони та підзони і використовувати класифікацію природних об'єктів залежно від їх господарського, наукового й естетичного значення за трьома категоріями (заповідні території, унікальні природні об'єкти; природні об'єкти, що зазнають помірного антропогенного навантаження; природні об'єкти з сильно переформованими чи штучними антропогенними екосистемами), для кожної з яких розроблено критерії оцінювання екологічного стану на базі уявлень про глибокі якісні перебудови екологічних систем під впливом антропогенних факторів [12].

II. Виявлення основних зацікавлених сторін.

Основними зацікавленими сторонами – поставальниками (власниками) і користувачами (споживачами) екосистемних послуг можуть виступати

національні уряди та місцеві органи управління, громадські групи, окремі землевласники, комерційні підприємства, неурядові організації тощо.

III. Оцінювання чистої віддачі від екосистемних послуг.

Оцінювання в економічній та натуральній формі є взаємодоповнюючими, оскільки характеризують різні сторони природного капіталу. Оцінювання чистої віддачі від екосистемних послуг внаслідок зміни виду використання даних екосистем або управління ними виконується із застосуванням різних методів вартісної оцінки [2].

Оцінювання вартісної цінності біорізноманіття водних об'єктів у грошових одиницях повинно виконуватися з урахуванням списку (складу) гідробіонтів, які мешкають у конкретному водному об'єкті, питомої річної продукції водних живих ресурсів, середньої роздрібно вартості в Україні промислових гідробіонтів і застосуванням різних методів вартісної оцінки, а також кількісного індикатору природного капіталу країни.

Для оцінювання біологічного різноманіття – як при визначенні вартості окремих видів біологічних ресурсів, так і при оцінюванні певних природних територій, що мають особливе екологічне й соціальне значення, – найчастіше у світовій практиці використовують три основні методи: порівняння продаж та капіталізації доходу, які складають гнучку систему оціночних показників, що достатньо повно відповідає практичним цілям реалізації економічних методів у сфері охорони природи й управління природокористуванням.

Найбільш поширеним способом оцінювання екосистемних послуг, у тому числі, біорізноманіття, є концепція загальної економічної цінності (Total Economic Value), згідно з якою величина загальної економічної цінності біорізноманіття є сумою вартості використання та вартості невикористання, які, у свою чергу, поділяються на певні складові. Також в останні роки розроблено інші способи визначення вартісної оцінки екосистемних послуг і біорізноманіття водних об'єктів, як грошового вираження економічної цінності екологічних ресурсів для прийняття управлінських рішень в екологічній сфері та розвитку платного природокористування, серед яких [9, 11]:

- поточне оцінювання (диференційна рента) екосистемних послуг, у тому числі біорізноманіття, у розрахунку на 1 га території (акваторії);
- вартісне оцінювання біологічного різноманіття території (акваторії);
- ціна відтворення окремих біологічних видів,
- загальні витрати на відновлення біологічних видів території (акваторії);
- коефіцієнт еколого-економічної цінності біологічного виду;
- інтегральне вартісне оцінювання екосистемних послуг.

На наш погляд, розрахунок вартісної цінності екосистемних послуг (R_{eni}) доцільно виконувати на підставі теорії екологічної ренти – сучасної модифікації класичної теорії земельної ренти з урахуванням ефективності відтворення в економічній та екологічній площинах.

Розрахунок виконується для чотирьох основних типів природних екосистем: лісових, лугових, природних болотних і водних за формулою [13]:

$$R_{eni} = \left(R_i \frac{q_e}{q_{eki}} - 1 \right) \quad (6)$$

де: R_i – поточне (щорічне) оцінювання (диференційна рента) для i -го типу екосистеми, дол. США/га;

q_e – капіталізатор економічної сфери (прийнято на рівні 0,05);

q_{eki} – капіталізатор, значення якого обернено пропорційно строку відтворення природної речовини, яка споживається та складає основу природної екосистеми i -го типу.

IV. Аналіз і оцінювання розподілу витрат і благ серед основних зацікавлених сторін, розроблення пакету компенсаційних заходів.

Заключним етапом вартісного оцінювання екосистемних послуг водних об'єктів є прийняття рішень відносно шляхів подолання недооцінки або відсутності оцінки, збереження і раціонального використання за допомогою аналізу й оцінювання розподілу витрат і благ серед основних зацікавлених сторін, розроблення пакету компенсаційних заходів з урахуванням результатів вартісного оцінювання, формування механізму платежів за екослужби (ПЕП) з використанням відповідних до конкретної ситуації інструментів (субсидії, податки, платежі за екосистемні послуги, регулювання доступу до екосистемних послуг, інституційні заходи, створення та укріплення законодавства у сфері охорони довкілля, добровільна екологічна сертифікація та маркування) і платіжних схем (державні платіжні схеми, приватні домовленості, схеми комерційного обміну) [2].

З урахуванням світової практики, яка показала, що плата за екосистемні послуги може сприяти більш сталому управлінню ресурсами лише за дотримання певних умов, рекомендується поетапний процес розроблення та впровадження ПЕП, де центральне місце займає оцінювання екосистемних послуг. Окрім механізмів відшкодування за порушення природних екосистем, в системах платежів за екосистемні послуги доцільно враховувати витрати на ревіталізацію порушених екосистем. Припускається можливість періодичного перегляду оцінки, виконаної раніше, оскільки цінність екосистемних послуг з часом може змінюватися.

При розробленні заходів щодо компенсації збитків біорізноманіттю, необхідно дотримання відповідних існуючих в Україні механізмів відшкодування за порушення природних екосистем, а також вивчення і поступове введення нових схем платежів

за екосистемні послуги відповідно до рекомендацій ЄЕК ООН з урахуванням місцевих умов і світового досвіду впровадження схем ПЕП на різних рівнях – місцевому, національному, субрегіональному.

З метою забезпечення належного стану водних об'єктів і біорізноманіття як однієї з їх основних послуг важливо дотримання основних рекомендацій щодо відновлення гідроекосистем, зокрема: досягнення й підтримання сприятливого гідрологічного режиму водойм, санітарного стану та якості води, охорона цінних, рідкісних і зникаючих видів, моніторинг інвазійних видів і вжиття заходів щодо запобігання їх проникненню й поширенню, а також відновлення порушених екосистем.

Головні висновки. Запропонований комплексний підхід до оцінювання вартісної цінності екосистемних послуг водних об'єктів дозволяє поєднати екологічну складову з економічними інструментами управління, сприяє подоланню недооцінювання природного капіталу та формуванню економічних стимулів його збереження. При цьому біорізноманіття розглядається як ключова передумова стійкості та продуктивності водних екосистем і визначає їх здатність надавати широкий спектр екосистемних послуг з урахуванням витрати на ревіталізацію екосистем.

Використання множинної системи оціночних індикаторів надає можливість вирішення проблеми визначення різних аспектів цінності багатофункціональних елементів природоресурсного потенціалу й одночасно створити економічну основу для прийняття управлінських рішень у вигляді встановлення нормативних показників, які відображають конкретні види вартості природного ресурсу чи об'єкта, що оцінюється.

Застосування результатів оцінювання чистої віддачі від екосистемних послуг системою прийняття управлінських рішень відповідає сучасним принципам екосистемного підходу і сприяє досягненню стратегічних цілей та завдань національної екологічної політики, зокрема, «забезпеченню обов'язковості інтеграції екологічної складової до політик та/або програм загальнодержавного, галузевого (секторального), регіонального та місцевого розвитку» [1].

Перспективи використання результатів дослідження. Практичне впровадження результатів дослідження створює підґрунтя для розвитку механізмів платежів за екосистемні послуги, компенсації збитків біорізноманіттю та переходу від короткострокової експлуатації природних ресурсів до їх сталого використання.

Результати дослідження можуть бути використані в практиці державного управління водними ресурсами, екологічного планування та розроблення механізмів платежів за екосистемні послуги. Запропонований порядок оцінювання доцільно застосовувати під час обґрунтування природоохоронних заходів, оцінки екологічних збитків, формування регіональних програм збереження та відновлення водних екосистем.

Література

1. Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року: Закон України від 28.02.2019 № 2697-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text> (дата звернення 16.02.2026).
2. Наукове обґрунтування переліку водних екосистем, які забезпечують основні екосистемні послуги та порядок здійснення оцінки вартісної цінності їх біорізноманіття та розроблення рекомендацій щодо відновлення і збереження цих екосистем : Звіт про науково-дослідну роботу, II етап. УКРНДІЕП. 2018. Харків. 368 с.
3. А. Варуха Огляд підходів з оцінки екосистемних послуг через призму їхнього застосування для визначення збитків, завданих військовими діями РФ на території України / за заг. ред. О. Кравченко. Львів: «Компанія «Манускрипт»». 2022. 56 с. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31848.48640> (дата звернення 19.02.2026).
4. Методичні рекомендації щодо оцінки вартості послуг екосистем / О. Станкевич-Волосянчук, І. Тимченко, С. Савченко. 2023. 46 с. URL: <https://ekospha.org/wp-content/uploads/2023/06/methodology-of-ecosystem-services.pdf> (дата звернення 20.02.2026).
5. Екосистемний добробут: методика обрахунку екосистемних послуг непрямыми методами. Чернівці: Друк Арт. 2023. 184 с.
6. Бойко Т. Якість екосистемних послуг просторово-часової геосистеми в умовах впливу складної технічної системи: монографія / Т. Бойко, М. Руда. Київ: Яроченко Я.В. 2024. 230 с. DOI: <https://doi.org/10.51500/7826-59-9> (дата звернення 20.02.2026).
7. О.Г. Васенко, Г.Ю. Міланіч Методика оцінки вартісної цінності екосистемних послуг. *Проблеми охорони навколишнього природного середовища та екологічної безпеки*: зб. наук. пр. / УКРНДІЕП; ХНУ імені В.Н. Каразіна. Х.: ПП «Стиль-Іздат». 2022. Вип. 44. С. 29-37. URL: <http://www.niiep.kharkov.ua/sites/default/files/Sbornik2022.pdf> (дата звернення 24.02.2026).
8. Recommendations on Payments for Ecosystem Services in Integrated Water Resources Management / United Nations Economic Commission for Europe Convention on the Protection and Use of Transboundary Watercourses and International Lakes. New York and Geneva. 2007. P. 64. URL: https://unece.org/DAM/env/water/publications/documents/PES_Recommendations_web.pdf (дата звернення 26.02.2026).
9. The Economics of Ecosystems and Biodiversity: TEEB for National and International Policy Makers. 2010. P. 49. URL: <https://www.cbd.int/financial/values/g-accounting-teeb.pdf> (дата звернення 26.02.2026).
10. Mirka Laurila-Pant, Annukka Lehtikainen, Laura Uusitalo, Riikka Venesjärvi How to value biodiversity in environmental management. *Ecological Indicators*. 2015. Volume 55. P. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.02.034>. (дата звернення 26.02.2026).
11. de Groot, R. Brander, L. van der Ploeg, S. Costanza, R. Bernard, F. Braat, L. Christie, M. Crossman, N. Ghermandi, A. Hein, L. Hussain Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosystem Services*. 2012. 1(1), Pp. 50-61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.07.005> (дата звернення 26.02.2026).
12. Інтегральні та комплексні оцінки стану навколишнього природного середовища: монографія / О.Г. Васенко, О.В. Рибалова, С.Р. Артем'єв та ін. Х: НУГЗУ. 2015. 419 с.
13. Guide to the Millennium Assessment Reports // Millennium Ecosystem Assessment. URL: <http://www.millenniumassessment.org>.

Дата першого надходження статті до видання: 25.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

МОРФОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ТА ВОДНИЙ РЕЖИМ РІЧКИ СОВИЦЯ СТАВЧАНСЬКА І ЇЇ ПРИТОК

Григорійчук В.В., Пасічник М. Д., Кушнір Т.Ю.

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

вул. Коцюбинського, 2, 58012, м. Чернівці

v.hryhoriychuk@chnu.edu.ua, m.pasichnyk@chnu.edu.ua, kushnir.taras.yu@chnu.edu.ua

У статті наведено відомості про сучасний стан річки Совиці Ставчанської та її басейну, включно з двома правими безіменними притоками завдовжки понад 10 км. Визначено типи долини та русла на різних ділянках головної річки та приток. Розташування заплави відносно русла в означених водотоках двостороннє, що звичне для малих річкових долин. Проаналізоване зростання морфодинамічної контрастності у верхніх частинах долини та підвищену роль ерозійних і схилових процесів. Описано сучасний стан освоєння річкового басейну, узагальнено його фізико-географічні умови та особливості. Вони в комплексі зумовлюють швидку реакцію річки на опади, високу чутливість до змін інфільтраційних властивостей ґрунтів і мінімізацію природного протиерозійного та водорегулювального ефекту лісів. Однак, значна кількість ставків і меліоративні перетворення долини істотно модифікують природний стік. Визначено водний режим об'єкта як типовий для малих рівнинних річок лісостепу з підвищеною реактивністю до погодних умов і значною міжрічною мінливістю. Наведено основні розрахункові гідрологічні характеристики максимальних витрат, рівнів та водності. Пропорції норми річного стоку Совиці Ставчанської цілком типові для малих річкових систем. Річний стік різної забезпеченості відображає очікуваний спад об'ємів у міру зростання водності. Градація характерна для малих водозборів з вираженою міжрічною мінливістю та підтверджує, що навіть у межах одного басейну ресурс стоку суттєво залежний від умов зволоження. Підкреслено, що зимово-весняний паводковий компонент у цьому басейні нестабільний, періодично він значно більший або менший за середній рівень залежно від умов снігонакопичення, опадів тощо. Відзначено, що зливові максимуми приблизно вдвічі–втричі вищі, відповідно до властивостей менших і середніх басейнів. Результати дослідження важливі для подальшого розвитку цифрової моделі басейну річки Совиці Ставчанської, підвищення ефективності використання та керування водними ресурсами об'єкту, можуть бути використані при плануванні водогосподарської діяльності, управлінні річковими басейнами та забезпеченні сталого розвитку територій. *Ключові слова:* мала річка, водозбір, заплава, поверхневий стік, річковий басейн.

Morphological characteristics and water regime of the Sovytsia Stavchanska river and its tributaries. Pasichnyk M., Hryhoriichuk V., Kushnir T.

The article presents information on the current state of the Sovytsia Stavchanska River and its basin, including two unnamed right tributaries exceeding 10 km in length. The types of valley and channel morphology along different sections of the main river and its tributaries are identified. The floodplain location relative to the channel in these watercourses is predominantly two-sided, which is typical for small river valleys. An increase in morphodynamic contrast in the upper parts of the valley and the enhanced role of erosion and slope processes are analyzed.

The current state of land use within the river basin is described, and its physical-geographical conditions and characteristics are generalized. Taken together, these factors determine the rapid hydrological response of the river to precipitation, its high sensitivity to changes in soil infiltration properties, and the reduction of the natural anti-erosion and water-regulating effects of forests. At the same time, a considerable number of ponds and land-reclamation transformations of the valley substantially modify the natural runoff regime.

The water regime of the studied river is identified as typical for small lowland rivers of the forest-steppe zone, characterized by increased sensitivity to weather conditions and significant interannual variability. The main calculated hydrological characteristics of maximum discharges, water levels, and runoff are presented. The proportions of the mean annual runoff of the Sovytsia Stavchanska River are typical for small river systems. The annual runoff of different probabilities reflects the expected decrease in water volumes with increasing exceedance probability. This gradation is characteristic of small catchments with pronounced interannual variability and confirms that even within a single basin the runoff resources strongly depend on moisture conditions.

It is emphasized that the winter–spring flood component in this basin is unstable and may periodically be significantly higher or lower than the average level depending on snow accumulation and precipitation conditions. It is also noted that storm-induced peak discharges are approximately two to three times higher, which corresponds to the hydrological characteristics of small and medium-sized catchments. The results of the study are important for the further development of a digital basin model of the Sovytsia Stavchanska River, improving the efficiency of water-resource use and management, and may be applied in water-management planning, river basin management, and sustainable territorial development. *Key words:* small river, catchment, flood, surface runoff, river basin.

Постановка проблеми. Малі річки – важлива складова формування водних ресурсів річкових басейнів. Крім живлення більших водотоків, підтримки гідрологічного режиму територій вони часто використовуються як джерела водопостачання. У багатьох регіонах саме малі річки безпосередньо впливають на стан природного середовища та якість життя населення.



Водночас, якраз басейни малих річок найбільш чутливі до антропогенного впливу. Інтенсивне сільськогосподарське освоєння територій, урбанізація, меліоративні роботи, вирубування лісів, забруднення вод та зміни у землекористуванні призводять до трансформації природного гідрологічного режиму, зменшення водності, погіршення якості води та деградації руслових і заплавної екосистем. У результаті порушуються природні процеси формування стоку, змінюється баланс поверхневих і підземних вод. Це, в свою чергу, зумовлює дефіцит водних ресурсів, погіршення небезпечних гідрологічних явищ тощо [1;2].

Актуальність проблеми. Сучасні кліматичні зміни – один з найважливіших чинників, який потребує актуальних досліджень водних об'єктів, зокрема малих річкових басейнів. Переміна температурного режиму, нерівномірність випадання атмосферних опадів, збільшення частоти посушливих періодів і короткочасних інтенсивних злив зумовлюють коливання стоку та зміну водного режиму малих водотоків. Оскільки такі річки мають невеликі водозбірні площі та обмежені водні ресурси, вони швидше реагують на природні та антропогенні зміни. Відповідно, це підкреслює їхню важливість у відображенні стану довкілля.

Через це дослідження басейнів малих річок має важливе наукове і практичне значення. Воно сприяє глибшому розумінню процесів формування поверхневого стоку, ефективнішій оцінці водних ресурсів, визначенню рівня антропогенного навантаження та розробленню ефективних заходів щодо раціонального використання і охорони водних ресурсів. Отримані результати можуть бути використані при плануванні водогосподарської діяльності, управлінні річковими басейнами та забезпеченні сталого розвитку території.

Зв'язок авторського доробку з важливими науковими та практичними завданнями. Отримані результати мають важливе значення для вирішення практичних завдань у сфері управління водними ресурсами, зокрема для оцінювання водності малих річок, зокрема в басейні р.Прут, прогнозування змін їхнього гідрологічного режиму та обґрунтування заходів щодо раціонального використання і охорони водних об'єктів. Дослідження сприяє удосконаленню наукових підходів до аналізу стану малих річкових систем, що є важливим у контексті зростання антропогенного навантаження та сучасних кліматичних змін.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження малих річок та їхніх басейнів – важлива складова сучасних гідролого-геоморфологічних і геоecологічних досліджень [2]. Формуванню та функціонуванню системи «потік – русло – заплава» присвячено багато праць українських науковців.

Теоретичні основи дослідження річкових систем, гідрологічного режиму та басейнового підходу до

управління водними ресурсами висвітлено, зокрема, у працях О. Ободовського, В. Хільчевського. [3]

Важливе місце у вивченні річкових систем Передкарпаття посідають дослідження гідроморфологічних особливостей річок, розвитку руслових процесів і трансформації річкових долин. Значний внесок у дослідження цих питань зробили науковці Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича Ю. Ющенко, М. Пасічник, О. Паланичко, Л. Костенюк, М. Настюк та інші дослідники. Ними проаналізовано територіальну структуру річкових долин, закономірності руслоформування та особливості функціонування річкових геосистем у межах басейнів Пруту та Сірету та виконано значну кількість досліджень, що відображають сучасний стан річкових ландшафтів Передкарпаття. [4]

Методологічним підґрунтям для оцінки гідроморфологічного стану та антропогенної освоєності басейнів малих річок слугують фундаментальні праці з просторового моделювання та гідроекології. Як зазначають Климчик, Пінкіна та Пінкін (2018), впровадження системи інтегрованого управління водними ресурсами за басейновим принципом є критично важливим етапом, який вимагає точного картографування з використанням ГІС. Інтеграція Водної рамкової директиви (ВРД) 2000/60/ЄС формує нові вимоги до оцінки екологічного статусу водних об'єктів саме на основі гідроморфологічних показників (Сапко, 2024).

Сучасні дослідження також активно використовують геоінформаційні технології та методи дистанційного зондування Землі для аналізу динаміки річкових систем. За допомогою ГІС-аналізу встановлено особливості зміщення та меандрування русла річки Прут, а також просторові зміни його морфометричних характеристик упродовж тривалого історичного періоду. [4;8;9]

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Незважаючи на значний обсяг проведених досліджень, багато аспектів функціонування малих річкових басейнів Передкарпаття залишаються недостатньо вивченими. Зокрема, потребують подальшого аналізу питання впливу антропогенного навантаження, змін клімату та трансформації землекористування на формування стоку і гідроморфологічний стан малих річок, що обумовлює актуальність подальших комплексних досліджень у цьому напрямі.

Новизна. У дослідженні виконане структурування характеристик басейну р.Совиці Ставчанської та її приток, що дозволило інтерпретувати водний режим об'єкта як типовий для малих рівнинних річок лісостепу з підвищеною реактивністю до погодних умов і значною міжрічною мінливістю. Отримані результати сприяють кращому розумінню процесів формування водного режиму, просторової

структури водозбірних басейнів, впливу природних і антропогенних факторів на стан річкових систем. Це має важливе значення для розвитку гідрології, фізичної географії та геоєкології, а також для формування наукових основ раціонального використання і охорони водних ресурсів.

Методологічне значення. Методологічне значення дослідження полягає у застосуванні комплексного басейнового підходу до аналізу функціонування малих річкових систем. У роботі використано поєднання гідрологічних, географічних і геоінформаційних методів дослідження, що дозволяє розглядати водозбір малої річки як цілісну природно-територіальну систему, в межах якої відбувається формування стоку, взаємодія поверхневих і підземних вод, а також трансформація природних компонентів під впливом антропогенних факторів. Підхід сприяє поглибленню методичних засад дослідження малих річкових басейнів і розширює можливості комплексного аналізу гідрологічних процесів на локальному рівні.

Викладення основного матеріалу. Басейн річки Совиці Ставчанської знаходиться в межах Передкарпатського горбисто-улоговинного передгір'я. Більше 90 % басейну знаходиться в межах Чернівецької області на території Веренчанської,

Ставчанської, Кіцманської, Неполоківської та Мамаївської громад [10]. За генетичними ознаками рельєф нижньої ділянки (0-20 км) належить до водно-аккумулятивного типу, а вище за течією – до водно-ерозійного. Нижній відтинok має рівнинний характер, ділянка 20–43 км вирізняється горбисто-хвилястим рельєфом. У морфометричному відношенні нижня частина басейну слабкорозчленована, тоді як вище за течією розчленованість середня. Абсолютні висоти поверхні змінюються в межах 300–170 м; густота розчленованості рельєфу – 0,71–4,39 км/км², а глибина ерозійного врізу – від 3 до 150 м. Совиця Ставчанська має дві праві притоки завдовжки понад 10 км (Рис. 1.).

Опираючись на паспортні дані [11] зазначимо, що тип долини на відрізку 0–20 км для головної річки та притоки 1 недостатньо виражений, тоді як для Совиці Ставчанської на 20–43 км і для притоки 2 U-подібний тип долини вже характерний. Такі переходи типу долини між нижньою та середньо-верхньою частинами, притаманні саме малим річкам, оскільки морфологічна виразність зростає у напрямку до ділянок з чіткішими бортами долини. Ширина долини основної річки 2000–7000 м, притоки 1 – 500–3000 м, притоки 2 – 1000–3500 м. Наведена ієрархія типова для річкової мережі басейнового типу, де головний

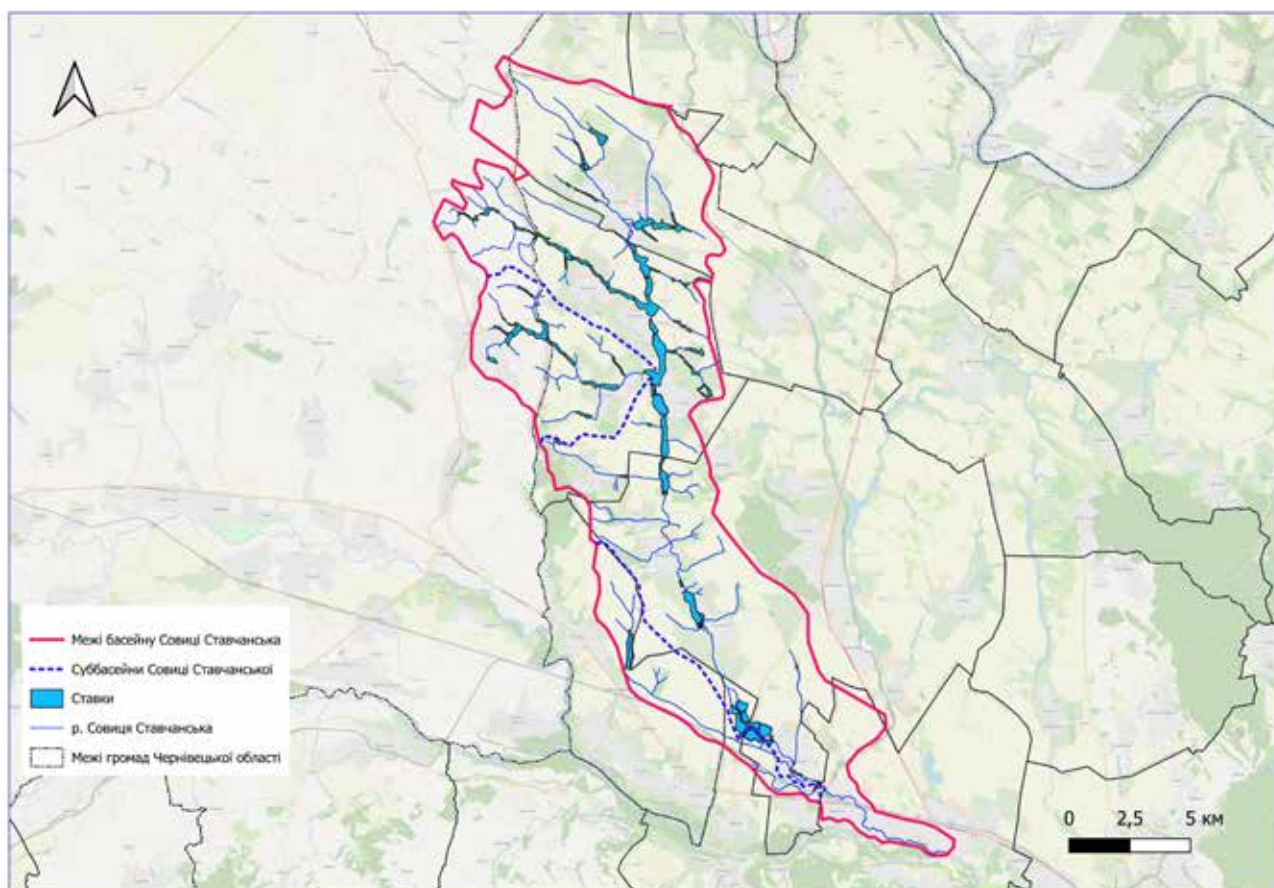


Рис. 1. Гідромережа басейну річки Совиця Ставчанська

водотік має найбільший масштаб долинного простору, а притоки – менший. Долина не терасована. Показники глибини ерозійного врізу для Совиці становлять 3–15 м на нижній ділянці і 40–140 м вище. Для притоки 1 глибина врізу 3–15 м, для притоки 2 – 30–150 м. Це вказує на зростання морфодинамічної контрастності у верхніх частинах долини та підвищену роль ерозійних і схлизових процесів, що загалом притаманне малим річкам із вираженою поздовжньою диференціацією рельєфу. Крутизна схилів відповідає типовому спектру схлизових умов для малих річкових долин у передгірно-рівнинних або хвилясто-рівнинних ландшафтах [12].

Серед джерел забруднення поверхневих і підземних вод основне – побічний вплив від скидів стоків фермерських господарств, особливо тваринного напрямку. На нижній ділянці відмічено замулення на Совиці та притоці 1 зі слабким ступенем прояву; на 20–43 км для Совиці й притоки 2 зафіксовано зсуви та яри також зі слабким ступенем прояву. Площинний змив проявляється помірно для всього басейну, причому він порівняно слабший для притоки 2. Така сукупність вказує на поєднання акумулятивних тенденцій у нижніх частинах долини з більш вираженою схисловою чутливістю у відрізках із більшими значеннями врізу та крутизни.

Загалом морфологічні показники та стан заплави річки Совиця Ставчанська та двох її приток довжиною понад 10 км (таблиця 1) підтверджують притаманний їм контраст енергії потоку вздовж течії: у нижчих відрізках зазвичай посилюється акумуляція дрібнозему та алювію, тоді як у середньо-верхніх ділянках частіше зростає роль ерозійних механізмів. Для притоки 1 зафіксовано водно-акумулятивний тип, а для притоки 2 – поєднання водно-акумулятивного і водно-ерозійного типів, що також є типовою картиною для приток різного морфодинамічного режиму в межах одного басейну. Розташування заплави відносно русла в усіх трьох водотоках двостороннє, що є звичною ознакою сформованих заплав у малих річкових долинах. Потужність алювію становить 1–4,5 м на Совиці та 1–3 м на притоках, що підтверджує більший акумулятивний потенціал головного русла порівняно з водотоками нижчого порядку. Ширина заплави 50–150 м на Совиці, 30–50 м на притоці 1 і 30–80 м на притоці 2 демонструє очікувану ієрархію масштабів заплавних поверхонь; такі значення є притаманними малим річкам рівнинно-хвилястих і передгірних територій із мозаїкою акумулятивних ділянок. Відносна висота заплави над середньомеженим рівнем води становить 1,8–2,7 м на Совиці, 0,8–1,2 м на притоці 1 і 1,2–1,7 м на притоці 2, що вказує на різні пороги виходу води на заплаву та різну чутливість до паводків у межах системи.

Глибини затоплення при максимальних у році витратах за забезпеченістю 1% узгоджуються з моделлю короточасних заплавних розливів, харак-

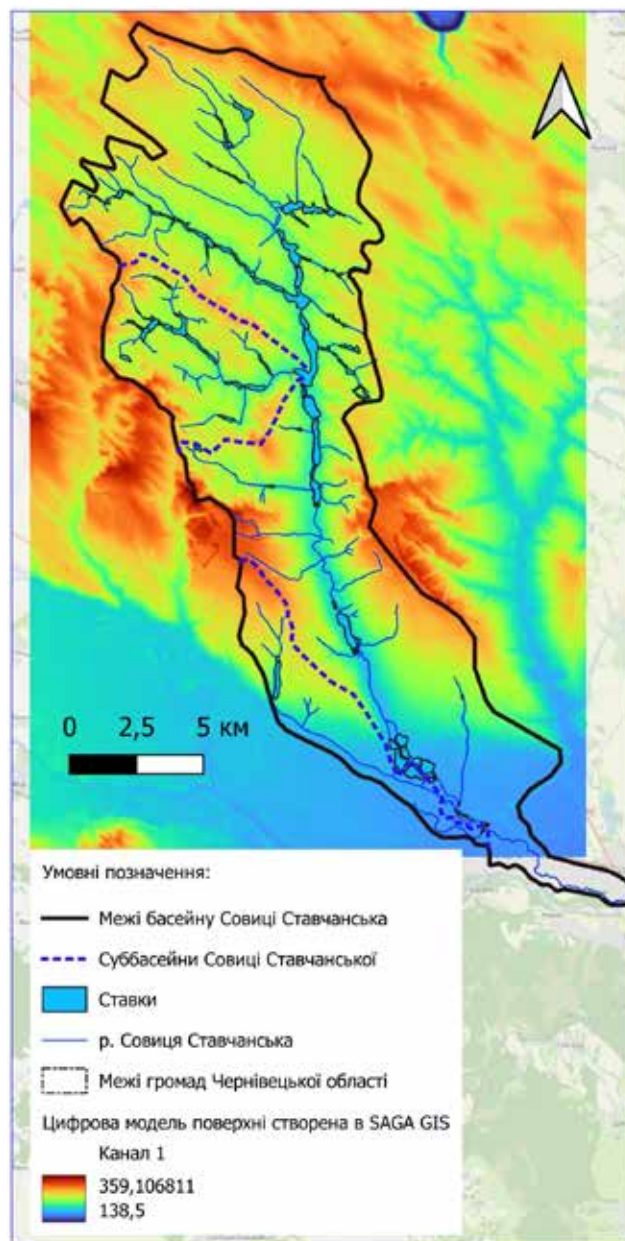


Рис. 2. Цифрова модель поверхні басейну р. Совиця Ставчанська

терних для малих басейнів із швидкою паводковою реакцією. Додаткові показники землекористування заплави демонструють суттєву антропогенну трансформацію [13]. Урбанізованість заплави майже відсутня і зафіксована лише для основної річки, що відповідає типовій концентрації поселень у долині головного водотоку. Заболоченість не зафіксована. Щодо джерел забруднення на території заплави можна відзначити понад десяток стихійних сміттєзвалищ біля прилеглих сіл.

Щодо характеристик русла потрібно зазначити, що для Совиці Ставчанської тип русла відносно прямолінійне, а для притоки 2 – звивисте; така відмінність притаманна для систем малих річок, оскільки окремі притоки можуть мати іншу морфодинаміку

Таблиця 1

Морфологія і стан заплави

Характеристика		Совиця (основна річка)		Притока 1 (>10 км)	Притока 2 (>10 км)
Тип заплави (на ділянці, км)		0–20	водно-аккумулятивна	водно-аккумулятивна	водно-аккумулятивна, водно-ерозійна
		20–43	водно-ерозійна		
Розташування заплави щодо русла		0–43	двостороння	двостороння	двостороння
Потужність алювію, м		0–43	1–4,5	1–3	1–3
Ширина заплави, м		0–43	50–150	30–50	30–80
Відносна висота заплави над середньомеженим рівнем води		0–43	1,8–2,7	0,8–1,2	1,2–1,7
Глибина затоплення при максимальних у році витратах, забезпеченість:	1%	0–43	0,3–0,4	0,1–0,2	0,2–0,3
	5%	0–43	0,1	0,1	0,1
	25%	0–43	–	–	–
Тривалість затоплення, днів		0–43	1	1	1
Залуження, %		0–43	5	13	80
Розораність заплави, %		0–43	14	15	10

Таблиця 2

Основні гідрологічні характеристики в розрахункових створах

Показник		Совиця, ств.1 (20–43 км)	Совиця, ств.2 (гирло)	Притока 1	Притока 2
Площа водозбору, км ²		150,7	246,5	23,4	19,0
Норма річного стоку	м ³ /с	0,65	1,06	0,10	0,084
	млн м ³	20,5	33,4	3,25	2,65
Коефіцієнт варіації річного стоку		0,51	0,51	0,51	0,51
Коефіцієнт асиметрії річного стоку		2,5	2,5	2,5	2,5
Річний стік, млн м ³ для забезпеченості	50%	18,5	30,2	2,93	2,39
	75%	13,0	21,2	2,06	1,68
	95%	7,48	12,2	1,19	0,97
Шар стоку у зимовий паводок, мм		45	45	45	45
Коефіцієнт варіації шару стоку		0,63	0,63	0,62	0,62
Коефіцієнт асиметрії шару стоку (водопілля)		1,26	1,26	1,24	1,24

порівняно з головним водотоком. Ширина русла знаходиться в межах 5–10 м на Совиці, і 2–6 м на притоках, що відповідає масштабу русел малих річок. Глибина на плесах для Совиці становить 0,9–1,0 м, для приток – 0,4–0,6 м; на перекатах – 0,2–0,3 м та 0,1–0,2 м відповідно. Наведені співвідношення глибин “плеса–перекати” характерні для русел з чіткою мікоморфологічною диференціацією, які часто відзначаються на малих рівнинних річках. Швидкості течії типові для малих річок, оскільки на перекатах швидкості вищі, ніж на плесах.

Замулення русла оцінене в межах 0,3–0,4 м для басейну. Заростання русла незначно фіксується винятково на притоці 1, відповідно, можна стверджувати, що деградація не відбувається. Довжина штучно спрямлених ділянок русла на Совиці становить близько 10%, в той же час русла приток суттєво зарегульовані, що є досить типовим явищем для малих річок у освоєних долинах. Структура угідь

показує переважання ріллі на Совиці і притоці 1, за переважання пасовищ на притоці 2 (близько 2/3); такі відмінності пояснюють різну інтенсивність поверхневого змиву та надходження наносів. Для Совиці та притоки 2 характерна наявність сінокосів і присадибних ділянок. Потрібно відзначити поступове зменшення господарської діяльності в межах досліджуваного басейну, через що спостерігається заростання територій чагарниками і дрібною деревною рослинністю.

У таблиці 2 наведено основні гідрологічні характеристики для розрахункових створів річки Совиця (ств. 1 і ств. 2) та двох приток довжиною понад 10 км, зокрема притоки 1 і притоки 2. Дані включають площу водозбору, норму річного стоку у витратній та об'ємній формах, статистичні параметри мінливості річного стоку, значення річного стоку різної забезпеченості, а також окремі показники зимових паводків. Площа водозбору для Совиці Ставчанської

має типове для малого басейну наростання акумульованого стоку вниз за течією. Для притоків наведені менші площі, що відповідає ієрархії річкової мережі.

Пропорції норми річного стоку цілком типові для малих річкових систем. Очевидно, що головне русло акумулює сумарний внесок і демонструє помітний приріст середньорічної водності на нижчих ділянках.

Коефіцієнт варіації річного стоку, як і коефіцієнт асиметрії річного стоку однаковий для всіх досліджуваних складових річкової мережі, що вказує на узгоджену регіональну характеристику мінливості річного стоку для даної системи і притаманний випадкам, коли статистичні параметри приймаються як типові для групи близьких за природними умовами водозборів.

Річний стік різної забезпеченості відображає очікуваний спад об'ємів у міру зростання водності. Градація характерна для малих водозборів з вираженою міжрічною мінливістю та підтверджує, що навіть у межах одного басейну ресурс стоку суттєво залежний від умов зволоження.

Коефіцієнт варіації шару стоку – відношення стандартного відхилення до середнього значення. Розраховані значення пояснюють досить високу міжрічну мінливість зимових паводків. У гідрологічній інтерпретації це означає, що зимово-весняний паводковий компонент у цьому басейні нестабільний: періодично він може бути значно більшим або меншим за середній рівень залежно від умов снігонакопичення та швидкості танення, відлиг, опадів, промерзання ґрунту.

Коефіцієнт асиметрії характеризує позитивну асиметрію розподілу: більшість років дають помірні

або відносно невеликі зимові паводкові шари, проте інколи виникають значно вищі за середні епізоди.

Ці показники вказують на подібний характер мінливості зимової паводковості у межах річкової системи. Загалом, наведене окреслює характеристику водності Совиці Ставчанської та її основних приток і підтверджує закономірності функціонування малих річок у межах локального басейну.

У таблиці 3 представлено максимальні витрати води і відповідні об'єми стоку заданої забезпеченості для двох розрахункових створів Совиці Ставчанської та двох приток (>10 км). Для найбільш екстремальних подій 1% забезпеченості максимальні витрати й об'єми стоку відповідно, найзначніші. За більш частих подій 5–25% забезпеченості закономірно фіксується зниження як пікових витрат, так і об'ємів стоку. Очевидно, що головний водотік має більші піки й об'єми через більшу площу водозбору, а нижчий за течією створ акумулює більший внесок приток і демонструє вищі розрахункові максимуми.

Власне зливові дощі як окремий тип паводкоутворення виділено в таблиці 4, яка показує, що для Совиці зливові пікові витрати істотно перевищують відповідні показники таблиці 3 при однакових рівнях забезпеченості. Тобто зливові максимуми приблизно вдвічі–втричі вищі, що цілком відповідає малим і середнім за площею басейнам, де короткочасні інтенсивні опади формують дуже імпульсні підйоми витрат. Водночас об'єми зливового стоку менші, ніж відповідні максимальні. Це також типова ілюстрація для коротких за тривалістю зливових паводків, коли гідрограф має крутий підйом і відносно швидкий спад.

Таблиця 3

Максимальні витрати води і об'єми забезпеченості стоку

Забезпеченість	Витрата, м ³ /с/об'єм, млн. м ³			
	Совиця, ств. 1	Совиця, ств. 2	Притока 1 (>10 км)	Притока 2 (>10 км)
1%	99,5 / 20,3	155 / 33,3	17,5 / 3,14	12,8 / 2,55
5%	86,6 / 15,0	135 / 24,5	15,2 / 2,31	11,1 / 1,87
10%	38,8 / 12,4	60,4 / 20,3	6,83 / 1,93	4,99 / 1,57
25%	18,9 / 9,06	29,4 / 14,8	3,33 / 1,40	2,43 / 1,14

Таблиця 4

Зливові дощі. Забезпеченість витрати і об'єми забезпеченості стоку

Забезпеченість	Витрата, м ³ /с/об'єм, млн. м ³			
	Совиця, ств. 1	Совиця, ств. 2	Притока 1 (>10 км)	Притока 2 (>10 км)
1%	284 / 9,12	464 / 13,5	45,8 / 1,68	37,3 / 1,37
5%	148 / 5,47	241 / 8,11	23,8 / 1,02	19,4 / 0,82
10%	133 / 3,92	218 / 5,81	16,9 / 0,72	13,8 / 0,59
25%	56,8 / 2,28	92,8 / 3,38	9,16 / 0,42	9,32 / 0,34

Таблиця 5

Мінімальні 30-денні витрати води холодного періоду

Забезпеченість	Одиниця виміру	Совиця, ств. 1	Совиця, ств. 2	Притока 1 (>10 км)	Притока (>10 км)
75%	м³/с	0,10	0,11	0,018	0,015
80%	м³/с	0,096	0,10	0,017	0,014
95%	м³/с	0,050	0,062	0,008	0,006

Мінімальні 30-денні витрати води холодного періоду зведені до таблиці 5, як індикатор стійкості базисного живлення та ризиків маловоддя. Як видно, для головної річки показники суттєво вищі, ніж для приток. Зменшення величин витрат у напрямку до вищої забезпеченості означає, що у холодний період річкова система має чітко виражений контраст між головним руслом і притоками за здатністю підтримувати стік у маловодні фази. Описане характерне для малим приток з меншим об'ємом підземного живлення та меншою інерційністю водозборів.

Головні висновки. Узагальнення фізико-географічних умов басейну показало, що ключовими зовнішніми чинниками формування стоку є поєднання помірнохвилястого рельєфу, кліматичних умов лісостепової зони та структури землекористування з низькою лісистістю, високою часткою ріллі й наявністю урбанізованих територій. Така комбінація зумовлює швидку реакцію річки на опади, високу чутливість до змін інфільтраційних властивостей ґрунтів і мінімізацію природного протиерозійного та водорегулювального ефекту лісів. Водночас значна кількість ставків і меліоративні перетворення долини істотно модифікують природний стік, трансформуючи як паводкову, так і маловодну складові водного режиму.

Зведення розрахункових витрат показують логічну та цілком типову для подібних малих річкових систем структуру: нижчий за течією створ Совиці характеризується більшими розрахунковими максимумами, зливові дощі формують найвищі

пікові витрати при відносно коротких і менших за об'ємом подіях, а мінімальний 30-денний стік холодного періоду підтверджує суттєво вищу стійкість водності головної річки порівняно з її притоками.

Опрацювання основних гідрологічних характеристик – норми та мінливості річного стоку, річного стоку різної забезпеченості, параметрів зимових паводків, зливових максимумів та мінімальних 30-денних витрат холодного періоду – дозволило інтерпретувати водний режим Совиці Ставчанської як типовий для малих рівнинних річок лісостепу з підвищеною реактивністю до погодних умов і значною міжрічною мінливістю. Підкреслено, що зимові паводки й зливові стани можуть становити істотну частку річного стоку, а періоди маловоддя характеризуються низькими витратами, що обмежує самоочисну здатність водотоку та підвищує його чутливість до забруднення, особливо в умовах інтенсивного аграрного використання заплави.

Перспективи використання результатів дослідження. Висвітлені результати дослідження важливі для подальшого розвитку цифрової моделі басейну річки Совиці Ставчанської, підвищення ефективності використання та керування водними ресурсами об'єкту, налагодження екологічної ситуації в басейні. Запропоновані підсумки можуть бути використані при подальших вивченні річкових систем, удосконаленні методів оцінювання водних ресурсів малих водозборів і розробці підходів до інтегрованого управління водними ресурсами в межах річкових басейнів.

Література:

- Мудрак О. В., Мудрак Г. В., Ганзюк О. В. Оцінка екологічного стану малих річок Східного Поділля в контексті сталого розвитку регіону. Екологічні науки. 2022. № 6 (45). С. 21–26.
- Кузик З., Кузик І. Оцінка антропогенного навантаження басейну річки Нічлава. Вісник Тернопільського відділу Українського географічного товариства. 2023. № 7 (7). С. 35–39.
- Гідроморфоекологічна оцінка руслових процесів річок верхньої частини басейну Тиси (в межах України): монографія / Ободовський Ю. О., Хільчевський В. К., Ободовський О. Г.; за ред. О. Г. Ободовського. – Київ : Прінт сервіс, 2018. 193 с.
- Гідроекологічне обґрунтування 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.
- 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> (дата звернення: 27.03.2026)
- 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. Р. 1–73.
- Сапко О. Ю. Стан впровадження вимог європейського законодавства щодо охорони і раціонального використання водних ресурсів в Україні. Екологічні науки. 2024. № 6 (57). С. 83–88. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.6-57.12> (дата звернення: 27.03.2026).

8. Пасічник М. Д. ГІС-моделювання водозбірної басейну та річкової мережі: аналіз гідрологічних процесів на прикладі басейну річки Брусниця. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2025. № 4 (78). С. 12–25. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2025.4.2>
9. 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>
10. Pasichnyk M., Hryhoriichuk V. High-resolution digital hydrographic model of a small agricultural catchment: an open-source GIS inventory for the Sovytsia Kitsmanska River basin (Ukraine). *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2025. № 4 (78). С. 12-25. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2025.4.2>
11. Паспорт р.Совиця (Топорів). Чернівецька область / Чернівецький філіал інституту «Укрдипроводгосп». Чернівці, 1994. 36 с.
12. Ющенко Ю.С. Геогідроморфологічні закономірності розвитку русел. Чернівці : Рута, 2005. 320 с.
13. Вудвуд, М., Пасічник, М., & Ющенко, Ю. Аналіз стану прибережних смуг вздовж річок Совиця Ставчанська і Совиця Кіцманська та їх ролі у збереженні якості водних об'єктів. *Науковий вісник Чернівецького університету: Географія*, 2024, 847, 135–143. <https://doi.org/10.31861/geo.2024.847.135-143>

Дата першого надходження статті до видання: 29.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

АНТРОПОГЕННЕ НАВАНТАЖЕННЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ВОДИ У БАСЕЙНІ РІЧКИ ХАДЖИДЕР

Даус М.Є.

Одеський національний морський університет

вул. Мечникова, 34, 65029, Одеса

dme2468@gmail.com

Річка Хаджидер одна із малих річок Причорномор'я, належить до басейну Чорного моря, поповнює прісною водою Тузлівські лимани, включена як один із пунктів діагностичного моніторингу по басейну річок Причорномор'я за критеріями транскордонні води та антропогенний вплив, зараз знаходиться у занедбаному стані. Басейн річки має значне антропогенне навантаження. Природний режим річки спотворений регулюючою дією гребель і забором води на зрошення. Освоєність басейну річки висока. У його межах розташовано 21 село, 18 сільськогосподарських підприємств. Виконана оцінка якості води та ризиків недосягнення екологічних цілей для хімічних та фізико-хімічних показників у пунктах спостережень с. Чистоводне (2009–2021 рр.) та с. Сергіївка (2003–2018 рр.). Розрахунок індексу забрудненості води модифікованого (ІЗВм) був проведений за такими показниками: розчинений кисень, біологічне споживання кисню за 5 діб (БСК₅), сульфати, магній, натрій, СПАР. За розрахунками ІЗВм якість вод у с. Чистоводне на кордоні з Молдовою змінювалася від IV класу «забруднені» (61,5%) до V класу «брудні» (23%) та VI класу «дуже брудні» (15%), у с. Сергіївка – від V класу «брудні» (12,5%) до VI класу «дуже брудні» (62,5%) та VII класу «надзвичайно брудні» (25%). Методом регресійного аналізу у пункті с. Сергіївка у хронологічному ході ІЗВм виявлена тенденція до погіршення якості води, коефіцієнт кореляції $r=0,47$ є статистично значущим. Також була виконана оцінка основних антропогенних навантажень та їхніх впливів на стан поверхневих вод за методичними рекомендаціями Держводагентства. Виявлено, що у с. Чистоводне оцінка «є ризик» за показниками оксигену, БСК₅ та середніми значеннями азоту амонійного, у с. Сергіївка оцінка «є ризик» за такими ж показниками та за середніми значеннями фосфатів. *Ключові слова:* індекс забрудненості води модифікований, оцінка якості води, ризик недосягнення екологічних цілей.

Anthropogenic pressure and assessment of water quality in the Khadzhide river basin. Daus M.

The Khadzhide River is one of the small rivers of the Black Sea region, belongs to the Black Sea basin, replenishes the Tuzlivsky estuaries with fresh water, is included as one of the diagnostic monitoring points for the Black Sea river basin according to the criteria of transboundary waters and anthropogenic impact, and is currently in a neglected state. The river basin has a significant anthropogenic load. The natural regime of the river is distorted by the regulating action of dams and water withdrawal for irrigation. The development of the river basin is high. There are 21 villages and 18 agricultural enterprises within its boundaries. An assessment of water quality and risks of failure to achieve environmental objectives for chemical and physicochemical indicators was carried out at the observation points of the village of Chystovodne (2009–2021) and the village of Sergiyevka (2003–2018). The calculation of the modified water pollution index (MPI) was carried out using the following indicators: dissolved oxygen, biological oxygen demand for 5 days (BOD₅), sulfates, magnesium, sodium, synthetic surfactants. According to the calculations of the MPI, the water quality in the village of Chystovodne on the border with Moldova changed from class IV “polluted” (61.5%) to class V “dirty” (23%) and class VI “very dirty” (15%), in the village of Sergiyevka – from class V “dirty” (12.5%) to class VI “very dirty” (62.5%) and class VII “extremely dirty” (25%). The regression analysis method in the village of Sergiyevka revealed a trend towards deterioration of water quality in the chronological course of the MPI, the correlation coefficient $r=0.47$ is statistically significant. An assessment of the main anthropogenic pressure and their impacts on the state of surface waters was also carried out according to the methodological recommendations of the State Water Agency. It was found that in the village of Chystovodne the assessment is “at risk” according to the indicators of oxygen, BOD₅ and average values of ammonium nitrogen, in the village of Sergiyevka the assessment is “at risk” according to the same indicators and average values of phosphates. *Key words:* modified water pollution index, water quality assessment, risk of failure to achieve environmental goals.

Постановка проблеми. Автори аналітичного звіту [1] відзначають, що південний регіон, куди відноситься і Одеська область, є найменш забезпеченим ресурсами поверхневих вод в Україні. Отже, кожна річка у цьому регіоні буквально «на вагу золота». Саме тому постійна комісія Одеської обласної ради з питань екології, природокористування, запобігання надзвичайним ситуаціям та ліквідації їх наслідків (протокол № 5 від 18 травня 2021 року) зазначила, що р. Хаджидер знаходиться у занедбаному стані,

підтримала звернення депутатів Одеської облради до Міністра захисту довкілля та природних ресурсів щодо вивчення екологічного стану, вирішення проблем та сприяння ревіталізації річки Хаджидер.

Актуальність дослідження. Річка Хаджидер включена як один із пунктів діагностичного моніторингу по басейну річок Причорномор'я за критеріями транскордонні води та антропогенний вплив [2]. Актуальність теми зумовлена високим антропогенним навантаженням на екосистему річки Хаджидер



та погіршенням якості її вод, транскордонним розташуванням річки.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Рішенням депутатів Одеської обласної ради [3] річка Хаджидер була включена до переліку річок щодо вивчення проблеми відновлення гідрологічного режиму та сприяння ревіталізації малих річок. Також територія річкових басейнів Хаджидер – Алкалія за номером UA0000577 була включена до списку територій, що пропонуються до включення у мережу Емеральд (Смарагдову мережу) України («тіньовий СПИСОК», частина 3) [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Річка Хаджидер була згадана у «Огляді стану забруднення навколишнього природного середовища на території України за даними спостережень гідрометеорологічних організацій у 2022, 2024 роках» [5] Центральної геофізичної обсерваторії імені Бориса Срезневського як одна із найбільш мінералізованих річок України, середня мінералізація річки склала за 2022 рік 10917 мг/дм³, вміст ХСК у 2024 році сягав 340 мгО/дм³ [6]. Екологічний стан річки Хаджидер досліджувався вченими Одеського національного університету [7-9]. Розраховувалися показники якості води за різними методиками та за різні періоди. Виявлено, що за коефіцієнтом забруднення якості води змінювалась від «чистих» (56 %), «помірно забруднених» (33 %) до «забруднених» (11 %) [7, 8], за «Методикою екологічної оцінки якості вод за відповідними категоріями» за загальним індексом за середніми значеннями води річки були за станом від «задовільних» до «дуже поганих», за ступенем чистоти – від «помірно забруднених» до «брудних» [9]. «Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Одеській області у 2017-2020 рр.» оцінює загальну екологічну обстановку у басейні річки Хаджидер як несприятливу. Автор [10] показує, що через забруднення комунальними та сільськогосподарськими стоками є ризик недосягнення екологічних цілей для хімічних та фізико-хімічних показників у створі р. Хаджидер – с. Сергіївка за киснем, БСК₅, азотом амонійним та фосфатами. Авторами фахових публікацій [11-13] розглянута можливість використання вод річки Хаджидер для іригації та виявлено, що через високу мінералізацію здатність вод для зрошення дуже мала, вода потребує хімічної меліорації.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Основною метою роботи є описання господарської діяльності на басейні, оцінка якості води річки Хаджидер за комплексним показником – індексом забруднення води модифікованим (ІЗВм), визначення категорії забруднення цих вод, їх придатність до рибогосподарського використання та оцінка основних антропогенних навантажень на стан поверхневих вод і визначення ризику недосягнення екологічних цілей особливо у сучасних умовах.

Новизна роботи полягає у прикладних дослідженнях екологічного стану вод р. Хаджидер за допомогою комплексного показника ІЗВм, виявленні можливості використання досліджуваних вод у рибогосподарській галузі, визначенні основних антропогенних навантажень на стан поверхневих вод та оцінка ризику недосягнення екологічних цілей для хімічних та фізико-хімічних показників вод.

Методологічне або загальнонаукове значення.

Для оцінки якості поверхневих вод використовувався гідрохімічний індекс забруднення води модифікований (ІЗВм) [14], в якому частина показників є постійною, а в якості інших беруть показники з найбільшим відношенням до гранично-допустимої концентрації (ГДК) так, щоб загальна кількість показників дорівнювала шести. При розрахунках ІЗВм використовувалися розчинений кисень, біохімічне споживання кисню (БСК₅), в якості обов'язкових показників та чотири показники з найбільшим відношенням до ГДК із списку: хімічне споживання кисню (ХСК), азот нітратний, азот нітритний, азот амонійний, сульфати, хлориди, кальцій, магній, натрій, калій, залізо загальне, марганець, мідь, нікель, нафтопродукти, фосфати, синтетичні поверхнево-активні речовини (СПАР).

Розрахунок ІЗВм проведений за такими показниками: розчинений кисень, БСК₅, сульфати, магній, натрій, СПАР. Значення кожного з показників порівнювалися із відповідними ГДК рибогосподарського призначення, надалі розраховувалися середні за рік значення ІЗВм. ІЗВм розраховувався за формулою [15]:

$$ІЗВм = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{ГДК_i}, \quad (1)$$

де C_i – середня концентрація одного з шести показників якості води, $ГДК_i$ – гранично допустима концентрація кожного з шести показників якості води.

В залежності від обчисленого значення ІЗВм виділено сім класів забрудненості вод: *I* – дуже чиста (ІЗВм ≤ 0,2); *II* – чиста (ІЗВм 0,2-1,0); *III* – помірно забруднена (ІЗВм 1,0-2,0); *IV* – забруднена (ІЗВм 2,0-4,0); *V* – брудна (ІЗВм 4-6); *VI* – дуже брудна (ІЗВм 6-10); *VII* – надзвичайно брудна (ІЗВм > 10) [15].

Методика обчислення ІЗВм бере за основу хімічні речовини – показники антропогенного забруднення води. Ця оцінка дозволяє прослідкувати динаміку якості води в часі та рівень антропогенного навантаження на водну екосистему річки.

Для оцінки основних антропогенних навантажень на стан поверхневих вод і визначення ризику недосягнення екологічних цілей були використані «Методичні рекомендації щодо визначення основних антропогенних навантажень та їхніх впливів на стан поверхневих вод» [16], які розвивають пункт 2 частини другої статті 132 Водного кодексу України та пункт 6 постанови Кабінету Міністрів України

від 18 травня 2017 р. № 336 і впроваджують задачі співробітництва ЄС та України в сфері охорони природного навколишнього середовища. Критерієм оцінки основних антропогенних навантажень на стан поверхневих вод або масивів поверхневих вод (МПВ) є визначення ризику недосягнення екологічних цілей. В залежності від якісних або кількісних показників антропогенних навантажень виділено 3 категорії наслідків антропогенного впливу: «без ризику»; «можливо під ризиком»; «під ризиком» [16]. Результати оцінки основних антропогенних навантажень та їхніх впливів є основою для розроблення та виконання програми заходів для досягнення екологічних цілей.

Для виконання роботи використовувались дані спостережень за хімічним складом води Відокремленого підрозділу Басейнового управління водних ресурсів річок Причорномор'я та нижнього Дунаю «Причорноморський центр водних ресурсів та ґрунтів». Спостереження проводилися один раз на квартал, на постах р. Хаджидер – с. Чистоводне (68 км, кордон з республікою Молдова) за період з 2009 по 2021 роки та р. Хаджидер – с. Сергіївка за період з 2003 по 2018 роки.

Виклад основного матеріалу. Річка Хаджидер належить до басейну Чорного моря, протікає територією Білгород – Дністровського та Саратовського районів Одеської області, впадає в озеро Хаджидер, поповнює прісною водою Тузлівські лимани. За початок водного об'єкта прийнята точка земної поверхні з позначкою 165 м над рівнем моря, яка знаходиться на відстані 0,7 км на північ від с. Слободзія (Республіка Молдова) [15]. Довжина річки 93 км, площа водозбору 894 км², залісеність 4,4%, заболоченість 15%, розораність 66,8%. Норма річкового стоку складає 8,46 млн.м³, стік маловодного року забезпеченістю 75% становить 2,44 млн.м³, середньорічна витрата – 0,27 м³/с. Річка має одну притоку довжиною більше ніж 10 км (р. Каплань), довжина якої 42 км [15, 17].

Природний режим річок спотворений регулюючою дією гребель і забором води на зрошування, а на пригирловій ділянці – явищами згону-нагону з боку оз. Хаджидер. Споруджені водосховища (Крутоярівське, Хаджидерське, Русько-Іванівське) та ставки (Чистоводненський, Крутоярівський) [15, 17]. Це об'єкти загальнодержавного значення, мають гідроспороди IV класу, деякі в незадовільному стані та потребують ремонту.

Освоєність басейну річки висока. У його межах розташовано 21 село (вздовж берегової смуги – 9), 18 сільськогосподарських підприємств. На території басейну проживає приблизно 26,83 тис. осіб. Найбільш великими промисловими підприємствами є Агропромисловий комплекс «Дністровський». Сільськогосподарська освоєність басейну становить 83,6%, що на 23,8% більше освоєності території України в цілому [18].

У використанні земельних ресурсів в останні роки спостерігається зміна структури сільгоспугідь за рахунок урбанізації, виділення садово-городніх ділянок, розвитку водно-вітрової ерозії. Стан окремих факторів природного середовища та спрямованість процесів, які в ньому проходять, обумовлюють загальну екологічну обстановку в басейні, яка в даний час оцінюється як несприятлива [18].

Домінуючі умови, що погіршують екологічну обстановку, такі:

- багаторічне, систематичне порушення сільськогосподарськими виробниками агротехнічних і агрохімічних прийомів землеробства;
- розорювання днищ балок і заплавних земель до урізу води, які призвели до зменшення вмісту гумусу, а з іншого боку, до замулення русла;
- змив і знесення ґрунтів, поверхневий стік і інфільтрація атмосферних опадів, забруднених відходами тваринницьких ферм, а також мінеральними добривами, отрутохімікатами і відходами комунального господарства;
- забруднення поверхневих і підземних вод, евтрофікація ставків і водосховищ;
- випрямлення русла річки з досягненням відміток дна нижче природних;
- розорювання земель, знищення та поправка деревно-чагарникової рослинності на схилах, сприяння інтенсифікації ерозійних процесів [18].

Великою проблемою з точки зору погіршення якості води у басейні є скидання забруднених стічних вод. За даними регіональних доповідей про стан навколишнього природного середовища в Одеській області у 2017-2024 роках (табл. 1) видно, що з річки та її притоків систематично забирається вода для господарсько-побутових потреб, але повертається у меншій кількості та гіршої якості [18, 19]. На основі даних екологічних паспортів за 2023-2024 роки можна прослідкувати динаміку об'ємів скидання зворотних вод (тис. м³) та кількості забруднювальних речовин, що скидаються разом із зворотними водами (т) за 2021-2024 роки (табл. 2).

Одними із основних забруднювачів є ТОВ «Інфокс», КП «Білгород-Дністровськводоканал» та ПрАТ Одесавинпром. Тільки 60 % підприємств, які здійснюють скидання стічних вод у поверхневі водні об'єкти, мають затверджені проекти норм гранично допустимих скидів (ГДС) забруднюючих речовин.

У екологічних паспортах [18] та регіональних доповідях [19] відмічається, що багато очисних споруд та каналізаційних мереж були побудовані у 70-80 роках минулого століття, на сьогодні вони морально застаріли і не відповідають сучасним вимогам, передаються на баланс сільських рад, які не мають коштів на ремонт та належну експлуатацію споруд, не ведуться поточні та капітальні ремонти, аварійні ситуації на лініях каналізаційних мереж своєчасно не ліквідуються, відсутній постійний контроль за їх роботою, що призводить

Таблиця 1

Забір, використання та відведення води в річку Хаджидер за 2015-2020 роки

Рік	Забрано води із природних водних об'єктів (всього), млн. м ³	Використано води, млн. м ³	Водовідведення в річку Хаджидер	
			Всього, млн. м ³	З них забруднених зворотних вод, млн. м ³
2015	0,600	0,600	0,282	-
2016	-	-	0,003	-
2017	0,406	0,406	0,225	-
2018	0,489	0,489	0,009	-
2019	0,449	0,449	0,002	0,002
2020	*	*	0,002	-
2022	*	*	0,002	-
2023	*	*	0,001	-
2024	*	*	0,001	-

Таблиця 2

Скидання зворотних вод та забруднювальних речовин водокористувачами-забруднювачами поверхневих водних об'єктів в річку Хаджидер за 2021-2024 роки

Рік	Об'єми скидання зворотних вод, тис. м ³	Кількість забруднювальних речовин, що скидаються разом із зворотними водами, т
2021	1,0	1,3
2022	1,0	0,1
2023	1,0	0,2
2024	0,001	0,4

до забруднення земель і підземних водоносних горизонтів.

Однак, очисні споруди, які знаходяться у задовільному стані при порушенні технології очистки стічних вод не досягають проектних показників. У останні роки існує тенденція збільшення концентрації забруднювальних речовин на вході очисних споруд вище проектних показників, що призводить до перевищення концентрацій нормативних показників на виході з очисних споруд.

Результати досліджень якості води річки Хаджидер за ІЗВм за середніми річними значеннями представлені у табл. 3 та табл. 4.

Аналіз табл. 4 показує що, за ті ж роки за весь період спостережень вода у пункті Чистоводне на кордоні з Молдовою була чистішою ніж у пункті Сергіївка, який знаходиться на деякій відстані від гирла. Це підтверджують і графіки зміни якості води за кожен із спостережених дат, які показані на рис. 1 та рис. 2.

Для виявлення трендів у хронологічному ході ІЗВм був застосований метод регресійного аналізу. Коефіцієнти кореляції отриманих рівнянь були перевірені на статистичну значущість.

На першому етапі перевірка значущості проводилась наближеним методом – коефіцієнт кореляції r вважався значущим, якщо виконувалася умова:

$$r \geq 2\sigma_r, \quad (1)$$

де σ_r – середня квадратична похибка емпіричного коефіцієнта кореляції, яка визначалася за рівнянням:

$$\sigma_r = \frac{(1-r^2)}{\sqrt{n-1}}, \quad (2)$$

де n – довжина ряду.

На другому етапі розраховувалися значення критерію Стюдента:

$$t = \frac{|r|}{\sigma_r}, \quad (3)$$

які порівнювалися зі значеннями $t_{кр}(\alpha; v = n-1)$. Якщо $t < t_{кр}$, приймалася гіпотеза H_0 про статистичну незначущість, тобто про випадковість отриманої оцінки коефіцієнта кореляції. У протилежному випадку, коли $t > t_{кр}$, гіпотеза H_0 відкидалася й приймалася альтернативна гіпотеза H_1 про те, що коефіцієнт кореляції є статистично значущим [20].

Для пункту р. Хаджидер – с. Чистоводне (за 13 років було проведено 49 спостережень) коефіцієнт кореляції ($r=0,037$) незначущий, тобто не виявлено значущих тенденцій у будь-якій бік.

Для пункту р. Хаджидер – с. Сергіївка (за 19 років було проведено 61 спостереження) коефіцієнт кореляції склав $r=0,47$, середня квадратична похибка $\sigma_r=0,22$, критерій Стюдента $t=2,13$, $t_{кр}(\alpha; v = n-1)=2,10$. Тому коефіцієнт кореляції у пункті р. Хаджидер – с. Сергіївка є статистично

Таблиця 3

Повторюваність класів якості води (%) за середнім за рік показником ІЗВм

I	II	III	IV	V	VI	VII
р. Хаджидер – с. Чистоводне, 2009 – 2021 рр.						
-	-	-	61,5	23	15,5	-
р. Хаджидер – с. Сергіївка, 2003 – 2018 рр.						
				12,5	62,5	25,0

Таблиця 4

Зміни якості води річки Хаджидер за середніми річними значеннями ІЗВм, 2003 – 2021 рр.

Рік	Середнє значення ІЗВм	Клас якості води за середнім значенням ІЗВм	Середнє значення ІЗВм	Клас якості води за середнім значенням ІЗВм
	р. Хаджидер – с. Чистоводне		р. Хаджидер – с. Сергіївка	
2003	-	-	6,7	VI (дуже брудна)
2004	-	-	4,9	V (брудна)
2005	-	-	7,7	VI (дуже брудна)
2006	-	-	5,9	V (брудна)
2007	-	-	6,7	VI (дуже брудна)
2008	-	-	11,0	VII (надзвичайно брудна)
2009	2,63	IV (забруднена)	9,3	VI (дуже брудна)
2010	2,75	IV (забруднена)	9,7	VI (дуже брудна)
2011	7,02	VI (дуже брудна)	9,4	VI (дуже брудна)
2012	3,52	IV (забруднена)	9,3	VI (дуже брудна)
2013	3,93	IV (забруднена)	9,4	VI (дуже брудна)
2014	3,19	IV (забруднена)	8,9	VI (дуже брудна)
2015	6,16	VI (дуже брудна)	11,8	VII (надзвичайно брудна)
2016	3,29	IV (забруднена)	11,9	VII (надзвичайно брудна)
2017	3,24	IV (забруднена)	10,5	VII (надзвичайно брудна)
2018	4,59	V (брудна)	8,9	VI (дуже брудна)
2019	4,22	V (брудна)	-	-
2020	3,13	IV (забруднена)	-	-
2021	4,14	V (брудна)	-	-

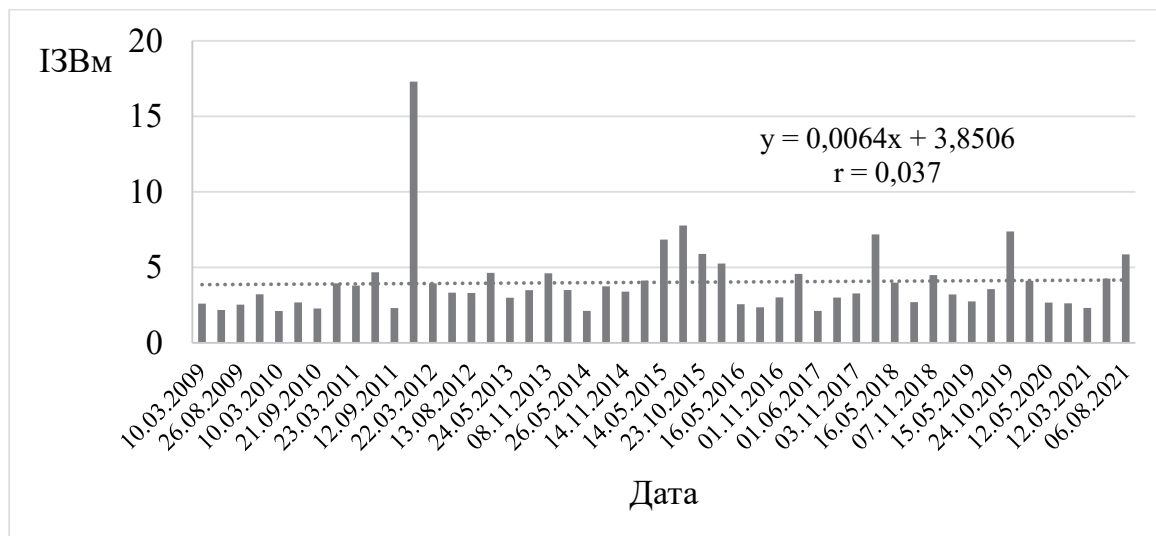


Рис. 1. Зміна значень ІЗВм на посту р. Хаджидер – с. Чистоводне

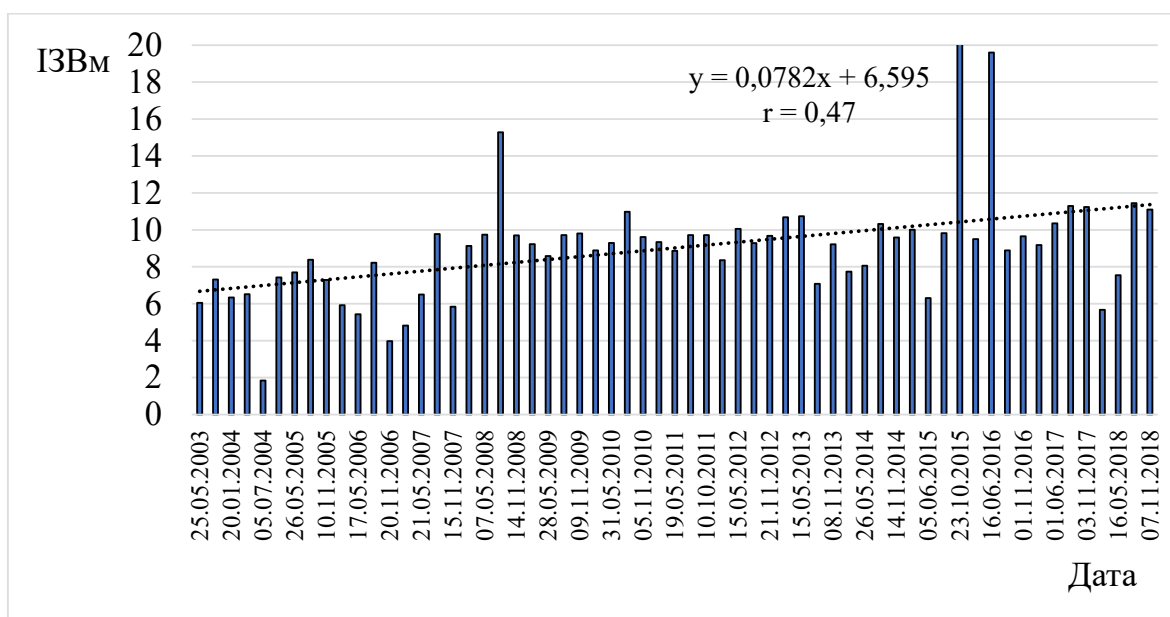


Рис. 2. Зміна значень ІЗМ на посту р. Хаджидер – с. Сергіївка

значущим. Можна зробити висновок, що за багаторічний період у цьому пункті є тенденція до погіршення якості води.

Також була виконана оцінка основних антропогенних навантажень та їхніх впливів, яка є основою для розроблення та виконання програми заходів для досягнення екологічних цілей. Для установлення ризику недосягнення екологічних цілей при моніторингу стану масивів поверхневих вод (МПВ) критичні значення хімічних та фізико-хімічних показників для МПВ малих річок [16] порівнювалися із фактичними у створах р. Хаджидер – с. Чистоводне та р. Хаджидер – с. Сергіївка за відповідні періоди спостережень (табл. 5). Перевищення граничних значень (для розчиненого оксигену – зниження) показників ставить МПВ під ризик недосягнення екологічних цілей.

Річка Хаджидер є транзитною річкою (проходить через територію Молдови та України), то визна-

чення основних антропогенних навантажень та їх вплив на екологічний стан річки і можливість одержання доброго екологічного статусу є дуже важливим для складання програми моніторингу. Наявність водосховищ та ставків вказує на можливість існування ризику недосягнення екологічних цілей через порушення неперервності потоку (існування дамб) та зміни гідрологічного режиму (регулювання стоку водосховищами). Тому у створі р.Хаджидер –с. Сергіївка об'єкт відноситься до другої категорії «можливо під ризиком».

Головні висновки. Отримані результати повністю корелюються із дослідженнями інших авторів. Води р. Хаджидер непридатні для господарсько-побутового, рибогосподарського водокористування без попереднього покращення їхнього стану. Незадовільний стан водних ресурсів обумовлений недотриманням водокористувачами екологічних

Таблиця 5

Оцінка ризику недосягнення екологічних цілей для хімічних та фізико-хімічних показників у створах р. Хаджидер – с. Чистоводне та р. Хаджидер – с. Сергіївка
(* – 10% процентіль, ** – 90% процентіль, *** – середнє значення)

Вид показника, Критичні значення	Фактичні значення	Висновок	Фактичні значення	Висновок
	р. Хаджидер – с. Чистоводне		р. Хаджидер – с. Сергіївка	
Оксиген* (% насичення), 75	52	є ризик	40	є ризик
БСК ₅ , 5	9,68	є ризик	8,84	є ризик
NH ₄ ** , 0,40	0,02	без ризику	0,03	без ризику
NH ₄ ***, 0,15	0,55	є ризик	0,59	є ризик
PO ₄ ***, 0,20	0,17	без ризику	0,35	є ризик
pH, 6,5-8,5	7,97	без ризику	7,80	без ризику

і санітарних норм, низькими темпами впровадження сучасних очисних технологій, відсутністю ефективних очисних споруд.

За період спостережень розрахунки та аналіз дозволяють зробити висновок що, у пункті р. Хаджидер – с. Чистоводне за 2009 – 2021 рр. 61,5 % випадків вода забрудненою, у 23 % – брудною, у 15,5 % – дуже брудною. У пункті р. Хаджидер – с. Сергіївка за 2003 – 2018 рр. 12,5 % випадків вода була брудною, у 62,5 % – дуже брудною, у 25 % – надзвичайно брудною. Відповідно до [15] «Води вищих класів» – це води з порушеними екологічними параметрами, їх екологічний стан оцінюється як екологічний регрес. Така вода не придатна для використання її для рибогосподарських потреб. Незадовільний екологічний стан поверхневих вод басейну р. Хаджидер обумовлює необхідність посилення уваги з боку природоохоронних органів на районному та обласному рівні

щодо нормалізації якості водних ресурсів.

Екологічний стан водного об'єкту, оцінений за БСК₅, коливається від стадії зворотних змін до стадії незворотних змін. Оцінка якості води за показником БСК₅ відображає лише вплив легкорозчинних органічних речовин. Також є «ризик недосягнення екологічних цілей» через недостатнє насичення води киснем та забруднення вод амонієм і фосфатами. Згідно із положеннями Водної рамкової директиви установлений ризик недосягнення екологічних цілей через значне антропогенне навантаження у створах р. Хаджидер – с. Чистоводне та р. Хаджидер – с. Сергіївка.

Перспективи використання результатів досліджень. Результати досліджень можуть бути використані для розробки комплексу заходів щодо відновлення екологічної рівноваги у водному басейні р. Хаджидер.

Література

1. Аналітичний звіт «Базове дослідження стану та напрямів розвитку екологічної політики України та перспектив посилення участі організацій громадянського суспільства у розробці та впровадженні політик, дружніх до довкілля» (період: 2018 – січень 2019) : Київ, 2019. 117с. https://www.irf.ua/wp-content/uploads/2019/12/baseline-research_report_publishing-dec-2019.pdf (дата звернення: 14.03.2026).
2. Протокол № 3 від 30 липня 2020 року онлайн-засідання басейнової ради річок Причорномор'я. <https://oouvr.gov.ua/diyalnist-buvr/monitoring/> (дата звернення: 14.03.2026).
3. Рішення депутатів Одеської обласної ради щодо вивчення проблеми та сприяння ревіталізації малих і середніх річок Одеської області від 18 червня 2021 року. <https://oblrada.od.gov.ua/wp-content/uploads/250-VIII.pdf> (дата звернення: 14.03.2026).
4. Території, що пропонуються до включення у мережу Емеральд (Смарагдову мережу) України («тіньовий СПИСОК», частина 3). https://uncg.org.ua/wp-content/uploads/2020/08/Emerald_3_2020.pdf (дата звернення: 14.03.2026).
5. Огляд стану забруднення навколишнього природного середовища на території України за даними спостережень гідрометеорологічних організацій у 2022 році. http://cgo-sreznevskyi.kyiv.ua/images/%D0%9E%D0%93%D0%9B%D0%AF%D0%94%D0%94_2022.pdf (дата звернення: 14.03.2026).
6. Огляд стану забруднення навколишнього природного середовища на території України за даними спостережень гідрометеорологічних організацій у 2024 році. https://cgo-sreznevskyi.kyiv.ua/images/%D0%9E%D0%93%D0%9B%D0%AF%D0%94_2024_%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D0%B2%D0%B0%D1%80%D1%96%D0%B0%D0%BD%D1%82doc_1-%D1%81%D0%B6%D0%B0%D1%82%D1%8B%D0%B9.pdf (дата звернення: 14.03.2026).
7. Кічук Н. С., Овчарук В. А., Кущенко Л. В., Лутай Д. В. Гідрохімічні показники та якість вод річок Причорномор'я в межах Одеської області. Матеріали 79-ї звітної наук. конф. професорсько-викладацького складу і наукових працівників факультету гідрометеорології і екології Одеського національного університету імені І. І. Мечникова, 27–29 лист. 2024 р. Одеса : Одес. нац. ун-т ім. І. І. Мечникова, 2024. С. 97–100. <https://dspace.onu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/e7b910fe-ad72-43c6-9286-1f0fab0114ed/content> (дата звернення: 14.03.2026).
8. Кущенко Д.П. Дослідження якості води малих річок межириччя Дунай–Дністер. Одеса : ОДЕКУ, 2022. 87 с. URL: <http://eprints.library.odku.edu.ua/id/eprint/11148> (дата звернення: 14.03.2026).
9. Тихоненко, Л. В. Сучасний екологічний стан вод річки Хаджидер. Одеськ. нац. ун-т ім. І. І. Мечникова. Одеса, 2024. 63 с. <https://dspace.onu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/48357862-9791-476f-ae89-c616ee31e78e/content> (дата звернення: 14.03.2026).
10. Даус М.Є. Визначення основних антропогенних навантажень та їхніх впливів на стан поверхневих вод річки Хаджидер. *Природничогоеографічні дослідження рельєфу, клімату та поверхневих вод: сучасний стан та перспективи розвитку (до 75-річчя кафедр КНУТШ: землезнавства та геоморфології; метеорології та кліматології; гідрології та гідроекології)* : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. Київ : КНУТШ, 2024. С. 20-22.
11. Блажко А.П. Еколого-іригаційне оцінювання якості поверхневих вод в басейні річки Хаджидер Одеської області. *Таврійський науковий вісник*. 2018. № 99. С. 210- 219. <https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewByFileId/648691.pdf> (дата звернення: 14.03.2026).
12. В.Д. Караулов, С.М. Юрасов, О.В. Мудрак, Г.В. Мудрак Іригаційний потенціал малих і середніх річок басейну Причорномор'я в межах Одеської області. *Збалансоване природокористування*. 2024. № 1. С. 68-74. DOI: 10.33730/2310-4678.1.2024.302626
13. Даус М.Є. Оцінка придатності води річки Хаджидер до використання у зрошенні (у межах Одеської області). *Екологія / Ecology – 2015 : 2015 рік*: матеріали V Всеукр. з'їзду екологів з міжнар. участю 23-26 верес. 2015р. Вінниця : Вінницький національний технічний університет. 2015. С. 75. <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/19106?locale-attribute=en> (дата звернення: 14.03.2026).

14. Сніжко С.І. Оцінка та прогнозування якості природних вод : монографія. Київ : НІКА – Центр, 2001. 264 с.
15. Швебе Г. І., Ігошин М. І. Каталог річок і водойм України : навч.-довідк. посіб. Одеса, 2003. 390 с.
16. Методичні рекомендації щодо визначення основних антропогенних навантажень та їхніх впливів на стан поверхневих вод. / Вихрист С., Мудра К., Осійський Е., та ін. Київ : Держводагенство, 2018. 21 с.
17. Управління водними ресурсами. Білгород-Дністровське міжрайонне управління водного господарства: веб-сайт. URL: <https://bd-muv.gov.ua/%D1%83%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BB%D1%96%D0%BD%D0%BD%D1%8F-%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%BC%D0%B8-%D1%80%D0%B5%D1%81%D1%83%D1%80%D1%81%D0%B0%D0%BC%D0%B8/> (дата звернення: 14.03.2026).
18. Екологічний паспорт. Одеська область. 2017-2024 рр. веб-сайт. URL: <https://ecology.od.gov.ua/zvity/> (дата звернення: 14.03.2026).
19. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Одеській області у 2018-2024 роках. веб-сайт. URL: <https://ecology.od.gov.ua/zvity/> (дата звернення: 14.03.2026).
20. Школьнік Є.П., Лосєва І.Д., Гончарова Л.Д. Обробка та аналіз гідрометеорологічної інформації: підручник. Київ : Міністерство освіти України, 1999. 538 с.

Дата першого надходження статті до видання: 31.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ФІЗІОЛОГІЧНОЇ ПОВНОЦІННОСТІ ПИТНОЇ ВОДИ З ТОЧОК РОЗЛИВУ У МІСТІ МИКОЛАЄВІ

Крисінська Д.О.¹, Беркань К.В.², Тимченко І.В.³

¹Чорноморський національний університет імені Петра Могили
68 Десантників, 10, 54000, м. Миколаїв

²Департамент житлово-комунального господарства Миколаївської міської ради
вул. Павла Скоропадського 7, 54006, м. Миколаїв

³Державний заклад «Луганський національний університет імені Тараса Шевченка»
вул. Старосвітська, 52, 37600, м. Миргород

d_krysinska@gw.necu.org.ua, katerbekovna13@gmail.com, inna.tymchenko@gw.necu.org.ua

У статті розглянуто актуальну проблему забезпечення населення міста Миколаєва якісною та фізіологічно повноцінною питною водою в умовах переходу від централізованої до децентралізованої системи водопостачання, спричиненого наслідками повномасштабного вторгнення. Після втрати основного джерела водопостачання місто стало залежним від локальних пунктів розливу, що використовують різні технології очищення, зокрема зворотний осмос, іонний обмін, ультрафіолетове знезараження та інші методи. Це зумовило значну варіативність показників якості води, особливо щодо її мінералізації та кислотно-лужного балансу.

Метою дослідження є оцінка фізіологічної повноцінності питної води з точок розливу. У роботі застосовано комплексний підхід, що включає аналіз стану системи водопостачання «до» та «після» 2022 року, польові дослідження з відбором проб у 20 точках міста, експрес-вимірювання показників рН і мінералізації за допомогою портативних приладів, а також просторове картографування результатів із використанням геоінформаційних технологій.

Отримані результати свідчать про значну неоднорідність якості води: лише 10 % досліджених проб відповідали нормативним значенням за обома показниками. У 80 % випадків зафіксовано недостатній рівень мінералізації, а у 40 % – відхилення рН у бік підвищеної кислотності. Встановлено, що надмірне очищення води призводить до зниження вмісту життєво необхідних мінералів, що негативно впливає на її фізіологічну цінність.

Авторами обґрунтовано необхідність впровадження технологій ремінералізації води, зокрема використання мінералізаційних картриджів, колон та систем дозованого додавання солей. Запропоновано також організаційні заходи, спрямовані на підвищення рівня поінформованості населення щодо безпечного споживання маломінералізованої води.

Практична значущість дослідження полягає у можливості використання отриманих результатів для вдосконалення системи моніторингу якості води та прийняття управлінських рішень на місцевому рівні. Отримані висновки можуть бути застосовані не лише для Миколаєва, а й для інших міст, що функціонують в умовах кризових змін систем водопостачання. *Ключові слова:* питна вода, система водопостачання, точки розливу, сталий розвиток, екологічний моніторинг, екологічна безпека, поверхневі води, Дніпро, Південний Буг, воєнні дії.

Evaluation of physiological completeness indicators of drinking water from bottling points in the city of Mykolaiv. **Krysinska D., Berkan K., Tymchenko I.**

The article addresses the urgent issue of providing the population of the city of Mykolaiv with high-quality and physiologically adequate drinking water under conditions of transition from a centralized to a decentralized water supply system caused by the consequences of the full-scale invasion. After the loss of the main water supply source, the city became dependent on local water dispensing points that use various purification technologies, including reverse osmosis, ion exchange, ultraviolet disinfection, and other methods. This has led to significant variability in water quality indicators, particularly in terms of mineralization and acid-base balance.

The aim of the study is to assess the physiological adequacy of drinking water from water dispensing points. A comprehensive approach was applied, including analysis of the water supply system before and after 2022, field studies with sampling at 20 locations across the city, rapid measurements of pH and mineralization using portable devices, and spatial mapping of the results using geoinformation technologies.

The obtained results indicate significant heterogeneity in water quality: only 10% of the analyzed samples met regulatory standards for both indicators. In 80% of cases, insufficient mineralization was recorded, while 40% showed pH deviations toward increased acidity. It was established that excessive water purification leads to a reduction in essential minerals, negatively affecting its physiological value.

The authors substantiate the need to implement water remineralization technologies, including the use of mineralization cartridges, columns, and systems for controlled dosing of mineral salts. Organizational measures aimed at increasing public awareness of the safe consumption of low-mineralized water are also proposed.

The practical significance of the study lies in the possibility of using the obtained results to improve water quality monitoring systems and support local-level decision-making. The findings can be applied not only to Mykolaiv but also to other cities operating under crisis-induced changes in water supply systems. *Key words:* drinking water, water supply system, filling points, sustainable development, environmental monitoring, environmental safety, surface waters, Dnipro, Southern Bug, military operations.



Постановка проблеми. Оцінка якості та фізіологічної повноцінності питної води в Миколаєві є ключовим елементом забезпечення санітарно-гігієнічної безпеки населення, особливо з огляду на зміну джерел водопостачання та перехід до децентралізованої моделі. Після втрати основного водогону, місто стало залежним від локальних пунктів розливу, які використовують різні системи очищення, що зумовлює значну варіативність показників води.

Актуальність дослідження. Якість питної води є одним із найважливіших чинників, що визначають стан здоров'я населення та рівень екологічної безпеки території. Вода бере участь у всіх життєво важливих процесах організму людини, забезпечуючи підтримання гомеостазу, транспортування поживних речовин, виведення продуктів обміну та терморегуляцію. Недостатня якість питної води або відхилення її складу від фізіологічно оптимальних параметрів можуть спричинити порушення обміну речовин, розвиток хронічних захворювань і зниження адаптаційних можливостей організму.

У сучасних умовах урбанізації, техногенного навантаження на довкілля та зношеності інженерних мереж забезпечення населення якісною питною водою стає однією з найактуальніших проблем для більшості українських міст. Особливо гостро це питання стоїть для міста Миколаєва, де центральна система водопостачання має значний рівень зношеності, а якість води з централізованих джерел часто не відповідає санітарно-гігієнічним нормам.

У зв'язку з цим мешканці міста все частіше віддають перевагу воді з так званих «точок розливу» – спеціалізованих пунктів, де вода проходить додаткове очищення за допомогою фільтраційних або мембранних технологій. Проте ефективність таких технологій та їхній вплив на фізіологічну повноцінність води потребують наукового обґрунтування й систематичного контролю. Адже надмірне очищення може призвести не лише до зниження концентрації шкідливих речовин, але й до втрати необхідних для організму мікро- та макроелементів, що формують фізіологічну цінність питної води.

Таким чином, оцінка фізіолого-гігієнічних показників води з точок розливу у місті Миколаєві є актуальним науковим і практичним завданням, спрямованим на визначення рівня її безпечності та відповідності вимогам державних стандартів і норм фізіологічної повноцінності.

Мета: оцінити показники фізіологічної повноцінності питної води з точок розливу у місті Миколаєві.

Об'єкт дослідження – питна вода з точок розливу у місті Миколаєві.

Предмет дослідження – показники фізіологічної повноцінності питної води з точок розливу.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати стан та технології системи питного водопостачання в місті Миколаєві в період «до» повномасштабного вторгнення і «після».

2. Здійснити забір зразків питної води з точок розливу у місті Миколаєві та проаналізувати відібрані зразки експрес-методами, акцентуючи увагу на показниках фізіологічної повноцінності.

3. Сформулювати пропозиції вирішення проблеми якості питної води в місті.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Проведене авторами дослідження відповідає загальній багаторічній науковій тематиці НДР та міжнародних проєктів, що виконуються на базі кафедри екології Чорноморського національного університету імені Петра Могили (НДР № державної реєстрації 0112U005117, НДР № державної реєстрації 0120U101959).

Практична значущість дослідження полягає в тому, що отримані результати можуть бути використані місцевими органами влади, Держпродспоживслужбою, лабораторними центрами МОЗ України, а також комунальними підприємствами водопостачання для вдосконалення системи моніторингу якості питної води на території міста. Впровадження таких даних у практику дає можливість оперативно виявляти відхилення від нормативів, прогнозувати тенденції зміни складу води та своєчасно вживати коригувальних заходів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідженнями якості питної води систем централізованого постачання та технології її очищення займаються українські і закордонні вчені багато років. Серед важливих напрацювань в цьому напрямку варто виділити дослідження, які проводили О. І Бондар, С. Л. Василенко, М. М. Гіроль, Н. Г. Насонкіна, Ф. В. Стольберг, О. А. Ткачук, О. В. Шестопалов, А. В. Яцик та ін. [1,4,9,13]

Крім того, у 2025 році було затверджено концепцію Державної соціальної програми до 2035 року, спрямовану на покращення доступу до якісної питної води та модернізацію систем водопостачання [10].

Разом з тим варто відзначити те, що ключовим фактором негативного впливу на роботу систем водопостачання, є вторгнення. Цей аспект детально описано в працях [2,12].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Проте тематика якості вод децентралізованих систем водопостачання в містах – є недостатньо вивченою. Враховуючи воєнний контекст появи нової децентралізованої системи водопостачання в місті Миколаєві, особливості її функціонування та експлуатації в період нестабільності і неоднорідності джерел водопостачання, вважаємо своєчасним і необхідним дане дослідження, а в подальшій перспективі – його продовження.

Новизна отриманих результатів дослідження полягає у комплексній оцінці показників фізіологічної повноцінності води з місцевих точок розливу

та розробці пропозицій щодо вирішення проблеми низької мінералізації у місті Миколаєві.

Матеріали та методи дослідження. В процесі виконання дослідження програмні пакети *Excel*, *Google Maps*, тощо.

Дослідження проводилося поетапно. Першим етапом став збір первинної інформації про точки розливу води, які функціонують на території населеного пункту. Для кожної точки фіксувалися такі дані: адреса, власник або підприємство, що здійснює діяльність, тип джерела водопостачання (централізоване або автономне) та метод очищення. Особливу увагу приділяли методу очищення води, оскільки саме він визначає її фізіологічну повноцінність і безпечність для споживання. Серед методів, що використовуються в сучасних точках розливу, виділяють механічну та вугільну фільтрацію, зворотний осмос, ультрафіолетове знезараження, озонування та іонний обмін. Кожен із цих способів має свої переваги й недоліки, тому під час дослідження зазначалося, який саме метод застосовується у кожній точці та скільки ступенів очищення проходить вода.

Другим етапом став виїзд на місця розташування точок, проведення візуального обстеження та фіксація санітарно-технічного стану обладнання. Приділено увагу чистоті території, стану резервуарів, кранів, шлангів, наявності інформаційних стендів із результатами аналізів води, а також доступність контактних даних підприємств. У разі відсутності актуальної інформації про якість води робилися відповідні позначки.

Третім етапом була організація відбору проб води для подальшого нагляду методом експрес-аналізу за допомогою солеміру, рН-метру. У процесі дослідження якості води було використано два портативні електронні прилади: TDS-метр AZ 8373 та рН-метр EZODO 7011. Обидва пристрої належать до групи польових вимірювальних інструментів, які забезпечують оперативне та достатньо точне отримання показників мінералізації та кислотно-лужного балансу води без потреби у стаціонарному лабораторному обладнанні [11,14]. Застосування таких приладів дає змогу виконувати вимірювання безпосередньо на місці відбору проб, що підвищує інформативність результатів та мінімізує вплив факторів транспортування й зберігання зразків.

Ці параметри дозволяють зробити висновок про відповідність води санітарним нормам та її фізіологічну повноцінність.

Останнім етапом дослідження стало нанесення отриманих результатів на карту Google Maps. Кожна точка отримала власну позначку з коротким описом: адреса, метод очищення, кількість ступенів фільтрації, результати аналізів та загальної оцінки якості. Такий підхід дозволяє наочно відобразити просторовий розподіл якості питної води у межах міста, порівняти ефективність різних систем очищення та виявити потенційні проблемні зони.

Таким чином, методика дослідження передбачала поєднання практичного збору даних, лабораторного аналізу та геоінформаційного відображення результатів. Це забезпечує комплексне уявлення про стан точок розливу та рівень фізіологічної повноцінності питної води, що реалізується населенню.

Виклад основного матеріалу. Система водопостачання міста Миколаєва історично належить до одних із найскладніших в Україні. Це зумовлено географічним розташуванням міста в південному посушливому регіоні, відсутністю природних підземних джерел достатньої якості та обсягу, а також значним технічним навантаженням на водопровідну інфраструктуру. Основним джерелом питної води до 2022 року був поверхневий водозабір із річки Дніпро, розташований у межах Херсонської області. Вода транспортувалася до міста по Південноукраїнському магістральному водогону протяжністю понад 70 км, який забезпечував централізовану подачу води до всіх районів Миколаєва. Протягом останніх років до повномасштабного вторгнення РФ на територію України, обсяг води, що подавався, становив приблизно 180–200 тис. м³ на добу, що відповідало середньодобовому споживанню міста та задовольняло потреби промислових підприємств [6].

До початку повномасштабного вторгнення російської федерації у 2022 році система централізованого водопостачання функціонувала у стабільному режимі. Основним оператором водопостачання було комунальне підприємство «Миколаївводоканал», яке забезпечувало комплексний цикл водопідготовки, включаючи забір, очищення, знезараження та подачу води споживачам (Рис. 1).

Якість води контролювалася відповідно до вимог ДСанПіН 2.2.4-171-10, що передбачало не лише мікробіологічну безпеку, а й фізіологічну повноцінність, тобто наявність необхідних для організму макро- і мікроелементів у допустимих концентраціях [7].

Джерелом водопостачання був водозабір з річки Дніпро, звідки вода подавалася на першу насосну станцію I підйому. Звідти водогін транспортував воду до очисних споруд водогону та насосної станції II підйому, розташованих у Корабельному районі (південь міста) (Рис. 2.).

Таким чином, інфраструктура МКП «Миколаївводоканал» являла собою комплекс взаємопов'язаних об'єктів – насосних станцій, очисних споруд, водогонів і водосховищ, які забезпечували безперебійну подачу питної води населенню міста Миколаєва [8].

Водночас водопровідна мережа міста мала значний фізичний знос: за оцінками спеціалістів, ступінь зношення трубопроводів сягав 60–70%, що часто призводило до аварій, витоків та вторинного забруднення води під час транспортування. У результаті у деяких районах міста спостерігалось локальне падіння тиску, застої води та утворення осаду у тру-

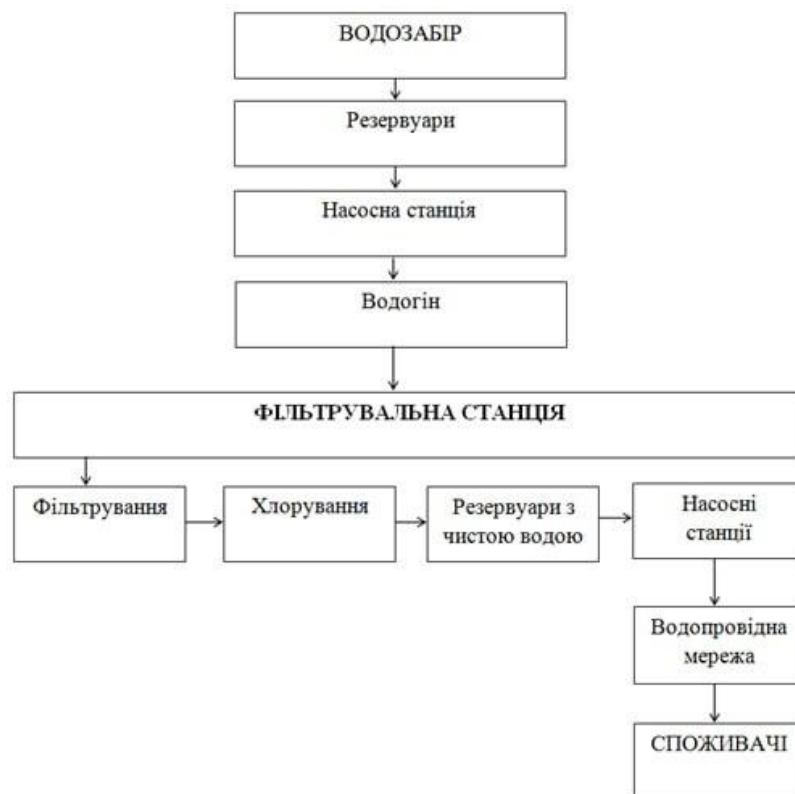


Рис. 1. Схема водопостачання на МКП «Миколаївводоканал» [4]

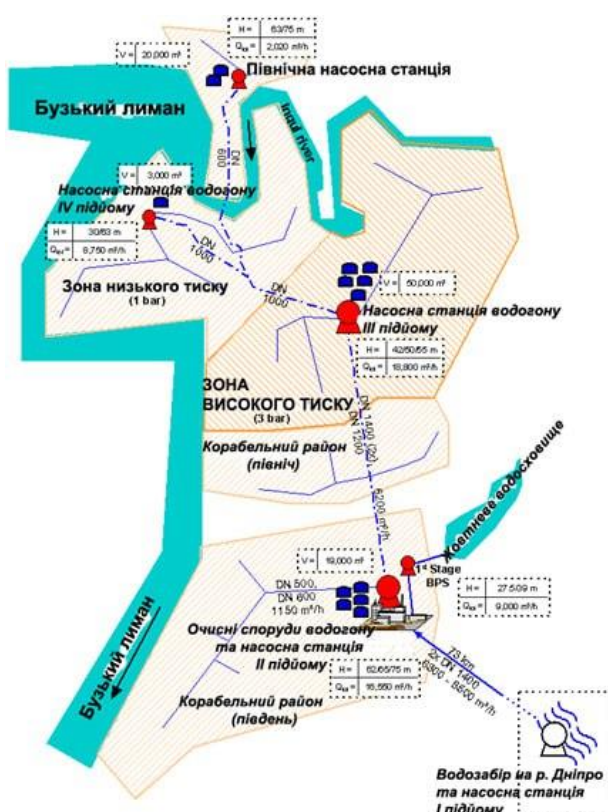


Рис. 2. Інфраструктура підприємства МКП «Миколаївводоканал» [4]

бах, що підвищувало ризик розвитку мікробіологічних забруднень.

Попри технічні обмеження, централізоване водопостачання залишалося головним джерелом питної води для населення, забезпечуючи більшу частину потреб міста. Дотримання санітарних норм і фізіологічної повноцінності води дозволяло задовольнити основні потреби людини у макро- та мікроелементах, необхідних для нормальної роботи серцево-судинної, нервової та травної систем, а також для підтримання водно-сольового балансу організму.

Таким чином, до початку 2022 року система водопостачання Миколаєва була достатньо ефективною, проте залежною від стабільності водозабору з Дніпра та стану фізично зношеної інфраструктури, що зумовлювало необхідність постійного моніторингу якості води та модернізації мережі.

Після початку повномасштабного вторгнення російської федерації у лютому 2022 року ситуація з водопостачанням у Миколаєві докорінно змінилася. Унаслідок бойових дій та окупації частини Херсонської області було зруйновано Південноукраїнський магістральний водогін, який до цього забезпечував місто водою з Дніпра. В результаті постачання дніпровської води до Миколаєва повністю припинилося, і місто опинилося у критичній ситуації через відсутність джерел прісної води для населення. Аварійні служби були змушені терміново шукати альтернативні джерела водозабезпечення та

організовувати тимчасові заходи для задоволення мінімальних потреб мешканців у воді.

У перші місяці після зупинки водогону місто змушене було використовувати технічну воду з річки Південний Буг, яка характеризувалася підвищеною мінералізацією – до 2–3 г/дм³ – і не відповідала санітарним вимогам до питної води. Така вода могла застосовуватися лише для технічних потреб: миття, прибирання, обслуговування комунальних об'єктів та промислових підприємств, проте не підходила для споживання людиною через високий вміст солей і можливу наявність шкідливих домішок.

Для забезпечення населення питною водою почали активно створювати децентралізовані пункти розливу, які отримували воду з різних джерел: артезіанських свердловин, підземних водних горизонтів або привозили попередньо очищену воду з інших регіонів.

В цих пунктах застосовувалися сучасні фільтраційні та знезаражувальні установки, які дозволяли забезпечити безпечність води для споживання. Такі системи зазвичай включали кілька ступенів очищення:

- механічну фільтрацію для видалення завислих часток і піску;
- активоване вугілля, для зниження органічного та хімічного забруднення, покращення органолептичних властивостей води;
- іонообмінні колонки, що дозволяють регулювати концентрацію кальцію, магнію та інших катіонів;
- зворотний осмос, який ефективно видаляє розчинені солі та мікроорганізми;
- ультрафіолетове або озонове знезараження, що забезпечує надійне знищення патогенних мікроорганізмів.

Хоча ці системи значно підвищують санітарну безпеку води, вони одночасно можуть знижувати концентрацію життєво необхідних мінералів, таких як кальцій, магній та калій, що негативно впливає на фізіологічну повноцінність води. Тому важливо проводити регулярний лабораторний контроль якості води з точок розливу, щоб оцінити її відповідність нормативам ДСанПіН та державним стандартам.

Згодом у місті сформувалася змішана система водопостачання, яка поєднувала використання різних джерел води. Технічна вода застосовувалася для побутових потреб, що не потребують питної якості (миття, прибирання, полив тощо). В той час, як питна вода реалізовувалася через пункти розливу, комерційні автомати та волонтерські організації.

Така модель водопостачання дозволила уникнути гуманітарної катастрофи, проте має низку ризиків:

- відсутність централізованого контролю якості;
- ймовірні порушення санітарних норм під час транспортування та зберігання води;
- ризики зниження фізіологічної повноцінності через надмірне очищення або нестабільність складу мінералів;

– можливе накопичення забруднюючих речовин у трубопроводах та резервуарах точок розливу через недостатній моніторинг і підтримку обладнання.

Стан водопостачання Миколаєва у цей період демонструє суттєві зміни в організації системи водозабезпечення під впливом воєнних дій. Перехід від централізованого водопостачання до децентралізованої моделі створив необхідність детального наукового дослідження якості води, зокрема визначення її фізіологічної повноцінності та відповідності гігієнічним нормам.

Основний нормативний документ, що визначає вимоги до якості питної води регламентує ДСанПіН 2.2.4-171-10 «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною», затверджений наказом МОЗ України від 12.05.2010 № 400. Документ установлює понад 90 показників якості, в тому числі показники фізіологічної повноцінності [3].

В процесі дослідження було проаналізовано такі показники фізіологічно повноцінної води:

1. Мінералізація – загальний вміст розчинених солей у межах приблизно 200–500 мг/л, що забезпечує оптимальне надходження мінеральних речовин в організм та сприяє нормальному обмінному процесу.
2. Значення pH – показник кислотно-лужного балансу має перебувати в діапазоні 6,5–8,5, що відповідає вимогам до питної води та є безпечним для здоров'я.
3. Органолептичні властивості – вода повинна бути прозорою, без запаху, стороннього присмаку та видимих домішок, що свідчить про відсутність забруднення та придатність до споживання.

У межах проведеного дослідження було здійснено відбір проб води в двадцяти різних точках мікромережі міста Миколаєва. Метою цього етапу було визначення двох ключових показників, що характеризують якість питної води – рівня мінералізації та показника pH. Для цього використано портативні прилади, які забезпечують оперативність та достовірність польових вимірювань.

Результати оперативних польових вимірювань, подані у таблиці 1, відображають значну варіабельність хімічних властивостей води у різних 20 пунктах відбору. Вимірювання проводилися за допомогою портативних приладів – TDS-метра AZ 8373 та pH-метра EZODO 7011, що забезпечило достатню точність визначення мінералізації та кислотно-лужного стану води безпосередньо на місці відбору.

Таким чином проаналізувавши 20 зразків проб води з точок розливу встановлено, що значення показника pH коливалося в межах від 5,03 до 7,47 (рис. 4), а рівень мінералізації води мав значну варіативність – від 20 до 415 мг/л (рис. 3).

У 40 % точок значення pH було нижчим за нормативний мінімум 6,5, тоді як 60 % проб відповідали

Таблиця 1

Показники рН та мінералізації води за точками відбору

№ зразку	Дата відбору зразку	Адреса точки відбору зразку	Отримане значення рН	Отримане значення мінералізації, Мг/л
1	10.07.2025	вул. Інженерна, 3	6.15	97
2	10.07.2025	вул. 2 Слобідська, 75 А	6.3	193
3	10.07.2025	вул. 1 Слобідська, 42	5.03	46
4	10.07.2025	вул. Рюміна, 9	7.47	309
5	10.07.2025	вул. Марка Кропивницького, 22 А	5.3	109
6	10.07.2025	вул. Героїв Рятувальників, 28	6.52	415
7	11.07.2025	вул. 6 Слобідська, 46	6.42	162
8	11.07.2025	вул. Погранична, 143	6.48	161
9	15.11.2025	вул. Курортна, 11 А	6.1	154
10	15.11.2025	вул. Біла, 71	5.4	25
11	15.11.2025	вул. Колодязна, 15	5.97	20
12	15.11.2025	вул. Корабелів, 14 В	6.8	32
13	15.11.2025	вул. Ковальська, 5	7.2	410
14	15.11.2025	вул. Генерала Олексі Алмазова, 20 А	6.67	137
15	15.11.2025	вул. 1 Лінія, 15	7.34	56
16	18.11.2025	вул. Дачна, 7 Б	7	197
17	18.11.2025	вул. Озерна, 15	7, 36	51
18	18.11.2025	вул. Дачна, 16	6.93	99
19	18.11.2025	вул. Гліба Бабіча, 24	7.15	46
20	18.11.2025	вул. Вадима Благовісного, 6	6.8	185

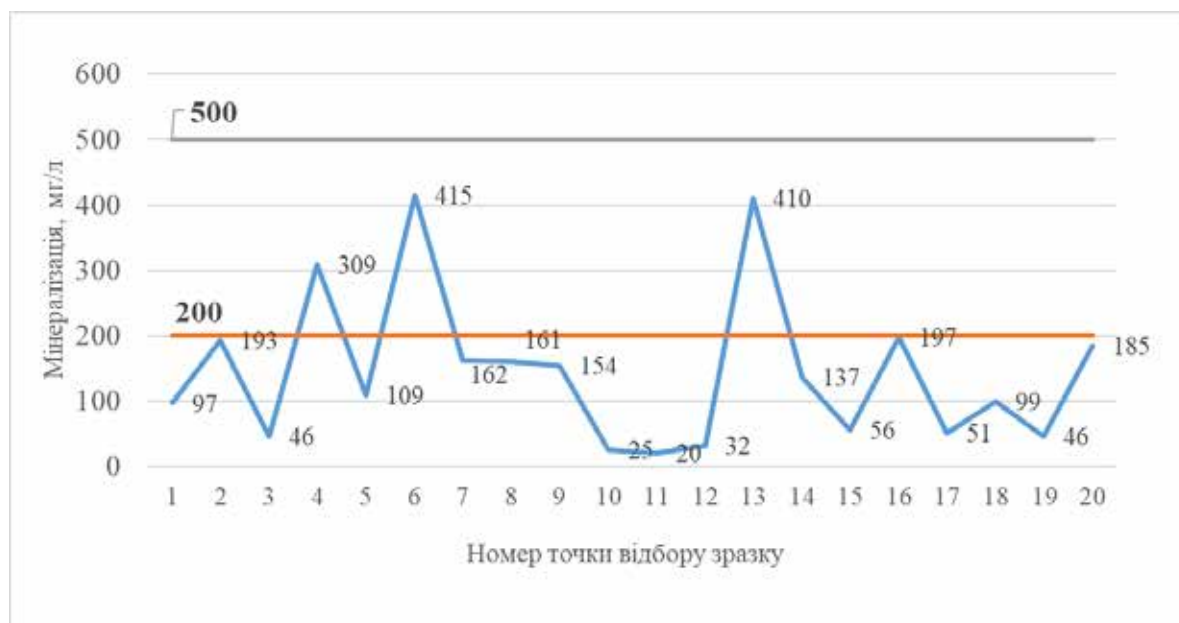


Рис. 3. Діаграма значень отриманих показників мінералізації у порівняння з нормативними значеннями

нормі або наближалися до неї. Найнижчий показник кислотності – 5,03 на вул. 1 Слобідська, 42 – був на 1,47 одиниці нижче значення нормативного стандарту, тоді як найвище значення – 7,47 на вул. Рюміна, 9 – повністю відповідало нормі. Середнє

значення рН становить – 6,47, що лише на,03 нижче мінімально допустимого.

Рівень мінералізації води мав значну варіативність – від 20 до 415 мг/л, що демонструє різницю більш як у 20 разів. Лише 20 % проб відповідали



Рис. 4. Діаграма значень отриманих показників рН у порівняння з нормативними значеннями

нормі 200–500 мг/л, тоді як 80 % мали недостатню мінералізацію, з них половина – менше 100 мг/л. Найнижчий показник – 20 мг/л на вул. Колодязна, 15 – становив лише 10 % від норми, тоді як найвищий – 415 мг/л на вул. Героїв Рятувальників, 28 – відповідав 83 % верхньої межі. Середня мінералізація становила 157 мг/л, що на 21,5 % нижче рекомендованого мінімуму.

Виявлено, що 20 % точок мали мінералізацію нижче 50 мг/л, тоді як підвищені показники (300+ мг/л) зафіксовані лише у 15 % проб. Оптимальний діапазон рН 7,0–7,5 спостерігався у 30 % точок, а у 25 % проб одночасно фіксувалися і низький рН, і мінералізація нижча 100 мг/л.

Лише 10 % проб відповідали нормам за обома досліджуваними показниками. Значення рН у межах нормативів зареєстровано у 30 % точок, і тільки одна з досліджуваних точок – вул. Героїв Рятувальників, 28 – мала оптимальні параметри і рН, і мінералізації.

В процесі дослідження було створено цифрову карту на основі сервісу Google My Maps, на яку нанесено всі наявні адреси пунктів видачі питної води в місті Миколаєві (рис. 5). Карта відображає просторовий розподіл пунктів видачі питної води у місті Миколаєві із позначенням їхньої якості за результатами лабораторних вимірювань.

На супутниковій основі Google нанесено три типи маркерів: зелені – точки з відповідною якістю води, жовті – із середніми показниками, червоні – з незадовільними. Карта дає можливість наочно оцінити різницю якості води в окремих районах міста, виявити ділянки з найбільш критичними відхиленнями показників рН і мінералізації та можливість відобразити їх просторове розташування у межах Центрального, Інгульського, Заводського та Корабельного районів міста.

У підсумку встановлено, що у 80 % точок розливу питної води, вода має недостатній рівень мінералізації, а 40 % проб характеризуються кислотністю нижче норми. Це підкреслює необхідність удосконалення системи водопідготовки та впровадження заходів для стабілізації хімічного складу води у місті.

У світовій практиці активно використовують технології ремінералізації води після очищення методами зворотного осмосу або іонного обміну. До найбільш поширених належать:

- Ремінералізаційні картриджі – фільтрувальні елементи, що збагачують воду кальцієм, магнієм та природними солями шляхом проходження її через мінеральні завантаження (кальцитові, доломітові, комбіновані).

- Мінералізаційні колони для централізованих та локальних систем, що дозволяють підвищити загальну жорсткість і мінералізацію до фізіологічних норм.

- Додавання мінеральних солей у контрольованих дозах, що застосовується у ряді країн з дуже м'якою водою (наприклад, Японія, Норвегія) [5].

Нижче наведено порівняння вищезазначених технологій з ремінералізації (табл. 2).

Порівняння трьох технологій ремінералізації показує, що кожна з них має свою оптимальну сферу застосування та різний рівень фінансових і технічних витрат.

Побутові ремінералізаційні картриджі є доступним рішенням для індивідуальних користувачів, але не підходять для великих обсягів. Мінералізаційні колони забезпечують стабільну якість і можуть застосовуватися на пунктах видачі води, проте потребують складнішого обслуговування. Найбільш точним і гнучким методом є дозоване додавання мінеральних солей, що дозволяє досягати норматив-

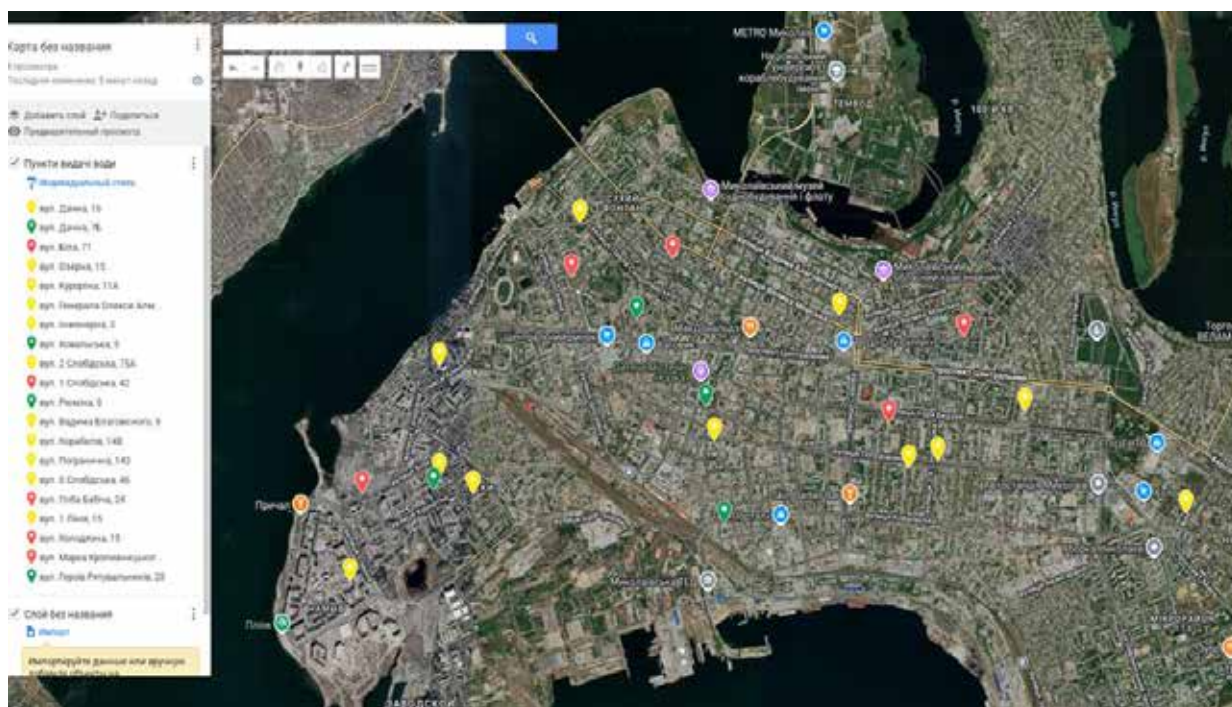


Рис. 5. Картографовані точки видачі води

Таблиця 2

Порівняльна таблиця технологій з ремінералізації води

Параметр	Ремінералізаційні картриджі	Мінералізаційні колони	Дозоване додавання мінеральних солей
Тип системи	Побутові та малі локальні	Локальні та централізовані	Централізовані та великі локальні
Принцип роботи	Розчинення мінералів при проходженні води	Контакт з шаром мінералів	Автоматичне дозування мінеральних солей
Рівень підвищення мінералізації	70–150 мг/л	100–300 мг/л	Гнучке налаштування 50–300+ мг/л
Обсяг води	10–20 л/год	0,5–20 м³/год	10–200+ м³/год
Стабільність	Середня	Висока	Дуже висока
Необхідне обладнання	Картридж, мінерали	Колона, насоси	Дозатор, сенсори
Ресурс	3–6 місяців	1–3 роки	Безстроково
Складність	Низька	Середня	Середня/висока
Витрати на встановлення	150–400 грн / до 10 тис.	30–600 тис. грн	80–250 тис. грн
Експлуатація	Низька	Низька/середня	Низька
Переваги	Дешево, просто	Великі обсяги	Точність
Недоліки	Малий обсяг	Потрібен монтаж	Потрібен контроль
Сфера застосування	Дім, офіс	Школи, лікарні	Централізовані системи

ної мінералізації у великих централізованих системах. Рациональний вибір технології залежить від масштабів системи, доступних ресурсів та необхідного рівня контролю над складом води.

Головні висновки та перспективи використання результатів дослідження. У результаті

аналізу проб води, відібраних у 20 точках міста Миколаєва, встановлено значну неоднорідність кисло-лужного стану та рівня мінералізації. Значення рН варіювали від 5,03 до 7,47, що вказує на вплив різних джерел та умов формування якості води.

Показники мінералізації коливалися від 20 до 415 мг/л. Найнижчі значення характерні для свердловин зі зворотним осмосом, що забезпечують дуже м'яку, але фізіологічно неповноцінну воду. Оптимальні або близькі до оптимальних значення мінералізації зафіксовані у шести досліджених точках. Значна частина проб показала занижену мінералізацію, що може бути пов'язано зі специфікою технологій очищення. Такі результати свідчать про неоднорідність хімічного складу води в міській децентралізованій мережі.

У ряді точок видачі води в місті Миколаєві зафіксовано показники мінералізації, близькі до рівня майже дистильованої води. Така вода є безпечною для короткочасного споживання, однак за тривалого використання може бути фізіологічно неповноцінною, оскільки не містить оптимальних концентрацій життєво необхідних мінералів (кальцію, магнію, гідрокарбонатів тощо). У зв'язку з цим, постає потреба у впровадженні технологічних та організаційних рішень, спрямованих на корекцію мінералізації води або забезпечення населення альтернативними, більш збалансованими джерелами.

Щодо технологічних рішень з ремінералізації води, аналізуючи міжнародний досвід можливо окреслити найефективніші підходи до компенсації низької мінералізації питної води у сучасних умовах. Аналіз порівняльних характеристик технологій засвідчив, що жодне рішення не є універсальним, а їх ефективність залежить від масштабів водопостачання, технічних можливостей та фінансових ресур-

сів. Побутові картриджі є доцільними для індивідуального споживання, проте їхня продуктивність не дозволяє використовувати такі системи у пунктах видачі води. Мінералізаційні колони забезпечують стабільний рівень збагачення, що робить їх придатними для соціальних об'єктів та локальних систем. Системи дозованого внесення мінеральних солей демонструють найвищу точність і застосовуються у великих централізованих мережах, де важливо підтримувати параметри води на нормативному рівні. Досвід Сінгапуру, Ізраїлю, Канади та скандинавських країн підтверджує, що ремінералізація є необхідною складовою сучасної водопідготовки.

Для умов міста Миколаєва актуальними виглядають як локальні технічні рішення, так і організаційні рекомендації для населення. Серед компенсаторних заходів для споживачів виділимо – комбінування води, використання мінералізаторів і планування питного режиму. Використання таких рішень, дозволить підтримувати мінеральний баланс навіть за відсутності технічних змін на пунктах видачі. Важливим аспектом вирішення проблемного питання є інформування населення щодо правильного використання маломінералізованої води. Таким чином, комплекс технічних та організаційних заходів може суттєво підвищити якість питної води та сприяти формуванню безпечного, фізіологічно повноцінного водного середовища в умовах не тільки міста Миколаєва, а й інших міст України, які в умовах змін клімату та внаслідок воєнної агресії РФ, можуть опинитися у подібній ситуації.

Література

1. Бондар О.І., Загорчевна Н.Б., Цветкова А.М. Проблеми водозабезпечення населення питною водою у зв'язку із поглибленням дефіциту доступних водних ресурсів. *Екологічні науки*. № 7 (34). С135-144. URL: <https://eco.j.dea.kiev.ua/archives/2021/7/25.pdf/> (дата звернення 17.03.2026).
2. Бондар О.І., Гандзюра В.П., Матвієнко М.Г. Вплив воєнних дій та їх наслідків на довкілля України. *Екологічні науки*. 2023. № 1(52). С. 7–15. URL: <https://eco.j.dea.kiev.ua/archives/2025/59/26.pdf/> (дата звернення 17.03.2026).
3. Державна санітарні норми та правила якості питної води : ДСанПіН 2.2.4-171-10. Київ : МОЗ України, 2010. 45 с. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text/> (дата звернення 17.03.2026).
4. Крисінська Д.О. Оцінювання рівня екологічної безпеки питного водопостачання : автореф. дис. канд. тех. наук : 21.06.01. Львів, 2021. 25 с. URL: <http://catalog.odnb.odessa.ua/opac/index.php?url=/notices/index/IdNotice:532966/Source:default/> (дата звернення 18.03.2026).
5. Коваленко В. П., Черниш О. М. Сучасні технології підготовки та корекції мінерального складу питної води. *Водопостачання та водовідведення*. 2021. № 4. С. 12–18. URL: <https://ir.kneu.edu.ua/> (дата звернення: 27.10.2025).
6. З історії Миколаївського водопроводу. URL: <https://archive.mk.ua/publications/z-istoriyi-mykolayivskogo-vodoprovodu/> (дата звернення 20.03.2026).
7. Миколаїв знову з водою: як місто повертає життя після руйнувань. URL: <https://mk-vodres.davr.gov.ua/node/2281/> (дата звернення 19.03.2026).
8. МКП «Миколаївводоканал» інформує. URL: <https://mykolaivmr.gov.ua/item/mkp-mykolayivvodokanal-informuye-2/> (дата звернення 19.03.2026).
9. Мокієнко А. В., Бабієнко В.В., Гушук І.В. Клімат, вода та інфекції: нові виклики для півдня України на тлі старих проблем. *Public Health Journal*, 2023. № 4. С. 41–49. URL: <https://journals.ostroh-academy.rv.ua/index.php/publichealth/article/view/39/> (дата звернення: 15.03.2026).
10. Програма покращення питного водопостачання України. URL: <https://dream.gov.ua/ua/public-program/DREAM-UA-070825BD97E874?fromUri=/spp-pipeline/> (дата звернення: 20.03.2026).
11. Солемір / TDS-метр ручний AZ-8373 : Товар на сайті SIMVOLT. URL: <https://simvolt.ua/solemir-tds-metr-ruchniy-az-8373/> (дата звернення: 20.03.2026).

12. Тимченко І., Крисінська Д., Гулевець В., Іванов Д., Савченко С., Христинченко Ю. Екологічні наслідки війни для громад: результати пілотної оцінки та рекомендації. – Київ, 2024. – 72 с. URL: <https://necu.org.ua/wp-content/uploads/2024/02/ekologichni-naslidky-vijny-dlya-gromad-rezultaty-pilotnoyi-oczinky-ta-rekomendacziyi.pdf/> (дата звернення: 15.03.2026).
13. Шестопалов О.В., Сакун А.О., Лізантав П.С., Кануннікова Н.О., Гайдучек О.Г., Томашевський Р.С., Воробйов Б.В. Аналіз показників якості води: сучасні аспекти і виклики. *Екологічні науки*. 2023. № 3(54). С. 76–82. URL: <https://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2024/3/12.pdf/> (дата звернення 18.03.2026).
14. рН/ОВП-метр/термометр водозахищений з АКТ EZODO 7011 : Товар на сайті SIMVOLT. URL: <https://simvolt.ua/ph-ovp-metr-termometr-vodozahischeniy-z-akt-ezodo-7011.html/> (дата звернення: 20.03.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 30.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

УДК 556.18:504.064:551.583(477.65/.73)

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.2-65.22>

ОЦІНКА ЯКОСТІ ВОДИ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО РИЗИКУ РІЧКИ ІНГУЛ В УМОВАХ АНТРОПОГЕННОГО ТА КЛІМАТИЧНОГО ВПЛИВУ

Магась Н.І.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
пр. Героїв України, 9, 54025, м. Миколаїв
nataly.magasy@gmail.com

У статті здійснено комплексну довгострокову оцінку якості води та екологічного ризику р. Інгул в умовах поєднаного впливу кліматичних змін і антропогенного навантаження. Актуальність дослідження зумовлена тим, що Інгул є соціально й господарсько значущою річкою степової зони України, стан якої визначається одночасною дією аридизації клімату, зарегульованості стоку, комунальних і промислових скидів, а також високої розораності басейну. Метою роботи є комплексна оцінка просторово-часових особливостей гідрохімічного режиму річки, виявлення точки зміни режиму, визначення інтегрального рівня екологічного ризику та обґрунтування пріоритетних водоохоронних заходів. Загальний масив гідрохімічних даних охоплював 1328 проб із семи постів спостереження за 1993–2025 рр., офіційні дані форми 2-ТП «водгосп» за 2019–2025 рр. та кліматичні дані ERA5-Land. Для обробки матеріалів застосовано аналіз часових рядів, тест Манна–Кендалла, оцінку нахилу Сена, тест Петтітта, критерій Вілкоксона, класифікацію за дослідженими фізико-хімічними показниками відповідно до вимог Водної рамкової директиви ЄС та Наказу Міндовкілля України № 332 від 01.04.2024, а також інтегральні показники R та ER. Встановлено, що провідними чинниками погіршення якості води є хронічне сульфатне та фосфатне навантаження, а в нижній течії додатково проявляються сезонні кисневі мінімуми. Для поста р. Інгул – м. Кропивницький виявлено статистично значущу точку зміни у 2007 р., після якої посилюються сульфатизація, мінералізація та екологічний ризик. За інтегральною оцінкою в межах досліджених фізико-хімічних показників жоден із семи постів не має підсумкового класу II; однією з найбільш проблемних за сукупністю окремих показників є ділянка нижче м. Кропивницький. Наукова новизна полягає у поєднанні довгого гідрохімічного ряду, кліматичного реаналізу, водогосподарської статистики та ризик-орієнтованої інтерпретації для р. Інгул, що дало змогу кількісно виявити сучасний режимний злам і обґрунтувати пріоритетність відновлення водної якості. Практичне значення результатів полягає у можливості їх використання під час підготовки Плану управління річковим басейном, модернізації очисних споруд, посилення контролю шахтних і комунальних скидів та вдосконалення басейнового моніторингу. *Ключові слова:* річка Інгул; якість води; екологічний ризик; кліматичні зміни; антропогенне навантаження; Водна рамкова директива ЄС; гідрохімічний моніторинг.

Water Quality and Ecological Risk of the Inhul River under Climate Change and Anthropogenic Pressure. Magas N.

The article presents a comprehensive long-term assessment of water quality and ecological risk in the Inhul River under the combined influence of climate change and anthropogenic pressure. The relevance of the study is determined by the fact that the Inhul is a socially and economically important river of the Ukrainian steppe zone, whose present condition is shaped simultaneously by climate aridization, flow regulation, municipal and industrial discharges, and intensive agricultural land use within the basin. The aim of the study is to evaluate the spatial and temporal features of the river's hydrochemical regime, identify the regime shift point, quantify the integrated ecological risk, and substantiate priority water protection measures. The total hydrochemical dataset comprised 1,328 water samples from seven monitoring sites for 1993–2025, official 2-TP “vodhosp” water-use statistics for 2019–2025, and ERA5-Land climate reanalysis data. The methodological framework included time-series analysis, the Mann–Kendall test, Sen's slope estimator, Pettitt's test, the Wilcoxon test, classification by the studied physico-chemical indicators in line with the EU Water Framework Directive and Order No. 332 of the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine dated 1 April 2024, as well as the integrated R and ER indices. The results show that chronic sulfate and phosphate loading constitutes the dominant driver of water quality deterioration, while in the lower reach this pattern is aggravated by seasonal oxygen minima. For the Inhul River site downstream of Kropyvnytskyi, a statistically significant change point was detected in 2007, followed by intensified sulfatization, mineralisation, and ecological risk. According to the studied physico-chemical indicators, none of the seven monitoring sites reaches Class II, while the river section affected by the Kropyvnytskyi urban-industrial node is among the most problematic by the combination of individual indicators. The scientific novelty of the study lies in the integration of a long hydrochemical record, climate reanalysis, official water-use reporting, and a risk-based interpretation for the Inhul River, which made it possible to quantify the recent regime shift and to justify priorities for water quality restoration. The practical significance of the results lies in their applicability to river basin management planning, wastewater treatment modernisation, tighter control of mine and municipal discharges, and improvement of basin-scale monitoring. *Key words:* Inhul River; water quality; ecological risk; climate change; anthropogenic pressure; EU Water Framework Directive; hydrochemical monitoring.



© Магась Н.І., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. Моніторинг річок степової зони України набуває особливої актуальності в умовах одночасного посилення кліматичної аридизації, трансформації водного балансу та зростання антропогенного навантаження на водні об'єкти. У таких умовах малі та середні річки степового регіону вирізняються підвищеною чутливістю до змін водності, скидів зворотних вод і трансформації гідрохімічного режиму. У цьому контексті р. Інгул є показовим прикладом басейну, в якому природна вразливість степової річкової системи поєднується з тривалим техногенним і водогосподарським навантаженням.

Річка Інгул (довжина 354 км, площа водозбору 9 890 км²) – ліва притока Південного Бугу, що перетинає Кіровоградську та Миколаївську області в меридіональному напрямку – від Придніпровської височини до Бузького лиману. Вона належить до рівнинних середніх річок степової зони й характеризується незначним поздовжнім похилом (0,55 ‰), що за умов зарегульованого стоку зумовлює уповільнений водообмін і підвищену акумуляційну здатність русла щодо розчинених речовин [1, 2].

Річка Інгул є не лише природною водною артерією степової зони, а й критично важливим елементом регіональної системи водокористування, в межах якої перетинаються інтереси комунального господарства, промисловості, аграрного виробництва та локального питного водозабезпечення. У верхній частині басейну вирішальне значення має вплив урбанізованого вузла м. Кропивницький, тоді як у нижній – функціонування водосховищ і руслових ділянок, пов'язаних із водопостачанням та іншими видами господарського використання води. Тому деградація якості води Інгулу становить не лише екологічний ризик, а й чинник зростання соціально-економічної вразливості територій басейну.

Антропогенне навантаження на р. Інгул формується чотирма структурно різнорідними, проте функціонально взаємопов'язаними джерелами тиску. Комунальні очисні споруди КП «Кіровоградводоканал», позбавлені вузлів біологічного видалення азоту і фосфору, забезпечують хронічне надходження біогенних речовин. Шахтні дренажні води ДП «СхідГЗК» формують специфічний мінеральний вектор деградації, зумовлений природним геохімічним фоном Українського кристалічного щита. Дифузний аграрний стік із розораних угідь (72,5 % площі водозбору) слугує вагомим джерелом нітратів і фосфатів. Нарешті, надмірна зарегульованість стоку (коефіцієнт ~44 %) подовжує час водообміну, посилюючи акумуляцію забруднювачів і їх концентрування у меженні та посушливі роки. Кількісний вимір і просторову асиметрію цих джерел тиску наведено далі у розділі, присвяченому аналізу водокористування і скидів.

Накладання антропогенних чинників на прогресуючі кліматичні тренди посушливості, задокумен-

товані за рядом ERA5-Land 1958–2025 [3], формують режим наростаючої аридності, у якому ефект гідрохімічного концентрування набуває нелінійного характеру [4]. У критично маловодні роки концентрації ключових іонів можуть істотно зростати відносно середньобогаторічного рівня, підсилюючи хімічне й екологічне навантаження на водні екосистеми річки.

Актуальність дослідження. У контексті імплементації Угоди про асоціацію між Україною та ЄС проблема якості поверхневих вод набуває стратегічного значення. Водна рамкова директива 2000/60/ЄС (далі – ВРД) слугує базовим нормативним орієнтиром для досягнення доброго стану вод і розроблення планів управління річковими басейнами [5]. В українському нормативному полі цей підхід конкретизовано сучасними ВРД-орієнтованими процедурами державного моніторингу, типології та класифікації масивів поверхневих вод, а також екологічними нормативами якості води [6–9]. Це зумовлює потребу в переоцінці ключових річкових систем за оновленими підходами до інтерпретації їхнього екологічного стану.

Кліматичні зміни утворюють принципово новий контекст для функціонування річкових екосистем степової зони, що досі залишається недостатньо дослідженим у кількісному вимірі. Комплексна оцінка якості поверхневих вод басейну р. Інгул – із кількісним аналізом трендів і точок зміни режиму, верифікацією гідрохімічних зрушень незалежними кліматичними даними та класифікацією за дослідженими фізико-хімічними показниками – у науковій літературі досі відсутня. Представлена стаття заповнює цю прогалину і пропонує підхід, відтворений для інших степових річкових басейнів України.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Робота тісно пов'язана з вирішенням завдань, визначених Водною стратегією України на період до 2050 року [10], Планом управління річковим басейном Південного Бугу на 2025–2030 роки [11], Обласною програмою «Питна вода Миколаївщини» на 2021–2025 роки [12], Комплексною програмою охорони довкілля Миколаївської області на 2021–2027 роки [13], а також науково-дослідною роботою «Розробка заходів та засобів раціонального водокористування, зниження антропогенного навантаження на водні екосистеми півдня України» (державний реєстраційний № 0124U001593). Практична спрямованість дослідження полягає в тому, що отримані результати можуть бути використані для уточнення басейнових пріоритетів, виявлення масивів поверхневих вод із підвищеним ризиком недосягнення екологічних цілей та обґрунтування пріоритетних водоохоронних заходів у межах басейну р. Інгул як частини району басейну Південного Бугу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичне підґрунтя аналізу якості поверхневих

вод степових річок України сформоване в межах вітчизняної гідрохімічної школи. Хільчевський В.К., Осадчий В.І. і Курило С.М. [1] систематизували закономірності формування іонного складу вод великих річкових систем і виявили специфічні геохімічні аномалії, зумовлені петрографічними особливостями підстильних порід. Для басейнів Кіровоградської та Миколаївської областей ключовим чинником природного фону визначено докембрійські гранітоїди Українського кристалічного щита, що зумовлюють підвищений вміст сульфатів і мінеральних іонів незалежно від антропогенного навантаження. Методологічні засади гідрохімічного аналізу для умов степової зони розроблено Осадчим В.І. зі співавторами [14], а оцінку водних ресурсів і якості вод для суміжної системи р. Південний Буг, до якої належить р. Інгул, подано у роботі [2].

Статистичну основу сучасних гідроекологічних досліджень формує арсенал непараметричних методів аналізу часових рядів, придатних для рядів із викидами та ненормальним розподілом. Тест Манна-Кендалла [15] є загальновизнаним стандартом виявлення монотонних трендів у гідрологічних та гідрохімічних рядах, а оцінювач Сена [16] – медіана усіх парних нахилів – забезпечує робастну кількісну характеристику швидкості зміни показника. Тест Петтітта [17], що максимізує знакову статистику U_t для виявлення найімовірнішого моменту зміни середнього рівня ряду, набув широкого застосування в аналізі кліматичних і гідрологічних переходів. Апробацію цих методів для якості вод річок Причорноморського регіону здійснено у [18], а вплив зміни клімату на водні ресурси Причорноморського регіону оцінено у [19].

Методологія оцінки екологічного ризику поверхневих вод розроблена Лободою Н. С. і Кузою А. М. [18], які запропонували і верифікували метод пробіт-функції (ER-індекс) для річок Причорноморського регіону. Романенко В. Д. зі співавторами [20] розробили категорійну методику оцінки якості вод, яка стала важливим етапом розвитку сучасних підходів до класифікації. Вплив кліматичних змін на якість поверхневих вод узагальнено у праці Вайтгеда та ін. [4], тоді як зміни посушливості й кліматичного режиму в Європі висвітлено у роботах Спіноні та ін. [21] і Сальмасо та ін. [22]. Реаналіз ERA5-Land [3] є придатним інструментом для аналізу температурних і гідрокліматичних змін на басейновому рівні.

Водночас для р. Інгул перелічені підходи в їх комплексному і взаємопов'язаному застосуванні залишалися поза полем дослідницької уваги. Наявні публікації, присвячені якості вод цієї річки, переважно обмежуються дескриптивним аналізом окремих гідрохімічних показників у певні роки або на локальних ділянках без встановлення статистично значущих закономірностей. Принципово важливі процедури – критичне зіставлення офіційної звітності 2-ТП «водгосп» з незалежними даними гідро-

хімічного моніторингу задля виявлення можливих артефактів, а також верифікація гідрохімічних точок зміни незалежними кліматичними рядами – для р. Інгул дотепер не реалізовувалися.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Для р. Інгул низка принципових питань досі залишалася поза увагою дослідників. По-перше, не було статистично обґрунтовано точки зміни гідрохімічного режиму на реперному посту нижче основних джерел антропогенного навантаження і не перевірено часову узгодженість цього переходу з кліматичними змінами на спільному часовому відрізку. По-друге, не проведено порівняльної оцінки ролі різних джерел забруднення – комунальних очисних споруд (КОС), шахтних дренажних вод і дифузного аграрного стоку – із встановленням пріоритетних чинників деградації. По-третє, відсутня порівняльна класифікація постів за дослідженими фізико-хімічними показниками відповідно до Наказу № 332/2024 і не розраховано динаміку ER-індексу за підперіодами. Нарешті, офіційні дані 2-ТП «водгосп» щодо категорій скидів практично не зіставлялися з незалежними даними моніторингу для виявлення можливих адміністративних артефактів у звітності.

Мета статті полягає у комплексній довгостроковій оцінці якості води та екологічного ризику р. Інгул за даними гідрохімічного моніторингу і кліматичного реаналізу. Для її досягнення передбачено виявлення точки зміни режиму, класифікацію постів за дослідженими фізико-хімічними показниками та обґрунтування пріоритетних водоохоронних заходів.

Новизна. Вперше для р. Інгул: (1) статистично ідентифіковано точку зміни гідрохімічного режиму у 2007 р. ($p = 0,0009$) на реперному посту р. Інгул-Кропивницький та показано її часову узгодженість із кліматичною точкою зміни температури 2006 р. ($p = 0,0006$) на спільному ряді 1993–2025; (2) показано провідну роль мінерального навантаження ($\text{SO}_4^{2-} + 61,6\%$) у погіршенні якості вод підперіоду 2 (2007–2025) за одночасного збереження хронічної фосфатної проблеми; (3) виявлено ознаки можливої облікової або адміністративної перекласифікації частини «забруднених» скидів у категорію «нормативно чистих» у звітності 2-ТП «водгосп» (2019–2020 рр.), що не супроводжується підтвердженням покращення якості води за даними гідрохімічного моніторингу; (4) виконано порівняльну класифікацію семи постів річкової системи р. Інгул за дослідженими фізико-хімічними показниками відповідно до Методики, затвердженої наказом Мінприроди України від 14.01.2019 № 5, у редакції зі змінами, внесеними наказом Міндовкілля України від 01.04.2024 № 332.

Методологічне або загальнонаукове значення. Запропонований підхід – паралельне застосування тесту Петтітта до гідрохімічних і кліматичних рядів на спільному часовому відрізку для верифікації

точки зміни – може бути використаний як відтворювана процедура в дослідженнях річкових басейнів із неоднаковою довжиною часових рядів. Він зменшує ризик некоректного зіставлення результатів із різних джерел даних і підвищує обґрунтованість висновків про структурні переходи. Виявлені ознаки перекласифікації скидів у звітності 2-ТП також підкреслюють потребу в незалежній верифікації офіційних статистичних даних.

Викладення основного матеріалу. Багаторічні спостереження в басейні р. Інгул засвідчили виразну просторово-часову неоднорідність гідрохімічних показників, що створює підґрунтя для аналізу структурних змін якості води та оцінки екологічного ризику.

Басейн розташований між 47°30'–49°00' пн. ш. і 31°30'–33°30' сх. д., охоплює частини Кіровоградської (67,9 %) та Миколаївської (32,1 %) областей (рис. 1). Річка цілком знаходиться в межах Українського кристалічного щита, який складений докембрійськими гранітоїдами й визначає природне збагачення вод сульфатами і мінеральними іонами.

Висока розораність водозбору – 72,5 % площі – є одним із найвищих показників серед середніх річок України, що визначає системне дифузне агрохімічне навантаження на р. Інгул і її притоки. За результа-

тами власних розрахунків на основі даних CORINE Land Cover 2018 [23], сіножаті та пасовища займають 10,2 %, а ліси – лише 5,8 %, тобто природна буферна ємність водозбору є вкрай обмеженою.

Мережа спостережень охоплювала сім постів на основному руслі р. Інгул та її притоках (рис. 1). Емпіричну основу дослідження становили CSV-архіви Державного агентства водних ресурсів України (ДАВР) по семи постах (табл. 1) [24], що охоплюють увесь гідрографічний профіль річки – від верхньої течії до нижньої руслової ділянки, включаючи притоки. У табл. 1 наведено характеристику постів спостережень, охоплених дослідженням; для окремих об'єктів використано категорії природних масивів поверхневих вод (МПВ), істотно змінених масивів поверхневих вод (ІЗМПВ) та кандидатних у істотно змінені масиви поверхневих вод (кІЗМПВ) відповідно до чинної національної методики. Загальний масив даних становив 1328 проб за 9 показниками. Кліматичні дані ERA5-Land (місячна температура і опади) отримано для центру іду басейну за 1958–2025 рр. [3]. Для аналізу структури водокористування та скидання зворотних вод додатково використано дані форми 2-ТП «водгосп» за 2019–2025 рр. [25]. Безпосередню пригирлову ділянку р. Інгул у районі м. Миколаїв не включено до

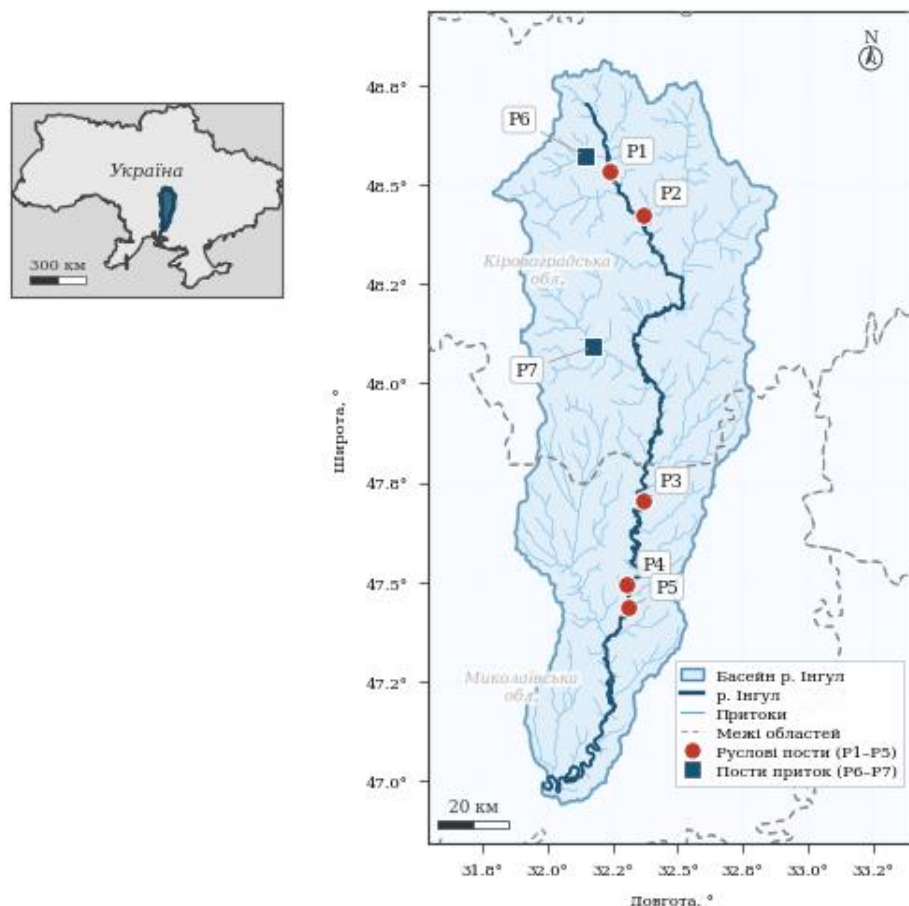


Рис. 1. Басейн р. Інгул і мережа постів гідрохімічного спостереження, використаних у дослідженні

Характеристика постів спостережень і база гідрохімічних даних

Назва посту	Тип МПВ	Відстань від гирла, км	Проб / роки	Особливості
р. Інгул–Кропивницький	Річка	318	381 / 1994–2025	Реперний пост; нижче впадіння р. Грузька, комунального водовідвідного вузла м. Кропивницький та зони впливу Інгульської шахти; найдовший ряд
р. Інгул–Первозванівка	Річка	305	145 / 2006–2018	Розташований нижче зони впливу Інгульської шахти; ключовий пост для кількісної оцінки локального мінерального навантаження шахтних вод
р. Інгул–Софіївське вдсх.	кІЗМПВ	163	369 / 1993–2025	Штучне водосховище нижче Кропивницького вузла; буферизація та седиментація забруднювачів
р. Інгул–Привільне	Річка	110	109 / 1993–2018, 2023–2025	Проміжний пост основного русла нижче Софіївського водосховища; об'єднаний ряд із перервою спостережень у 2019–2022 рр.
р. Інгул–Одрадне	Річка	103	74 / 2019–2025	Нижній русловий пост; кумулятивний сигнал верхньо- та середньобасейнових впливів
р. Грузька–Лелеківське вдсх.	кІЗМПВ	–	64 / 1996–2018	Права притока; водосховище на притоковій ланці; відображає вплив урбанізованого водозбору р. Грузька
р. Сугоклія–Бобринець	ІЗМПВ	26	186 / 2010–2025	Права притока; агрохімічне навантаження; висока природна мінералізація

основного аналізу, оскільки її гідрохімічний режим істотно модифікується впливом вод Бузького лиману і тому не є повністю зіставним із русловими постами басейну.

Аналітичний каркас дослідження сформовано у середовищі R v.4.5 (пакети tidyverse [26], trend [27]). Тест Манна–Кендалла [15] використано для перевірки наявності монотонного тренду; він є непараметричним, робастним до викидів і широко застосовується для гідрологічних та гідрохімічних рядів. Потенційний вплив серійної автокореляції враховано як методичне обмеження при інтерпретації р-значень, тому результати тесту розглядали спільно з оцінкою похилої Сена та тестом Петтітта. Похила Сена [16] – медіана усіх парних нахилів $(X_j - X_i) / (j - i)$ – є робастним оцінювачем швидкості зміни показника. Тест Петтітта [17] перевіряє нульову гіпотезу про однорідність ряду: статистика $U_{t,T} = \sum \sum \text{sgn}(X_i - X_j) (i \leq t, j > t)$ досягає максимуму у ймовірній точці зміни t^* . Тест Вілкоксона–Манна–Уїтні застосовано для порівняння медіан двох підперіодів ($\alpha = 0,05$).

Для характеристики міжрічної мінливості зволоження та ідентифікації посушливих і вологих фаз додатково використано стандартизований індекс опадів SPI-12, розрахований за 12-місячними сумами атмосферних опадів із ряду ERA5-Land для басейну р. Інгул. Значення $\text{SPI-12} < -1$ інтерпретувалися як посушливі умови, а $\text{SPI-12} > 1$ – як вологі. Індекс застосовано як допоміжний кліматичний індикатор

для інтерпретації режиму зволоження та візуального зіставлення з температурними аномаліями, а не як окремий критерій гідрохімічної класифікації.

Ключовим методологічним рішенням, що розмежовує запропонований підхід із суто описовим зіставленням двох незалежних рядів, є вибір спільного часового відрізка 1993–2025 для паралельного застосування тесту Петтітта до гідрохімічних і кліматичних даних. Такий підхід забезпечує коректніше порівняння часових рядів різної повноти й дозволяє інтерпретувати близькість точок зміни як статистично обґрунтовану часову узгодженість, а не як формальну якісну аналогію.

Інтегральний рівень забруднення оцінювали за індексом R: $R = \ln(\sum(C_i/\text{ГДК}_i)/n)$, де C_i – фактична концентрація i-го показника, ГДК_i – відповідне нормативне значення, n – кількість показників у розрахунку. Для розчиненого кисню (DO) враховували дефіцит відносно нормативу; до розрахунку включали NH_4^+ , БСК₅, DO, NO_3^- , NO_2^- і SO_4^{2-} , тоді як PO_4^{3-} не включали через неоднорідність ранньої частини ряду. Екологічний ризик визначали за показником ER, апробованим у попередніх дослідженнях і адаптованим для р. Інгул: $\text{ER} = \Phi(\text{Prob})$, де Prob = $-2,3 + 2,21 \cdot \lg(\sum(C_i/\text{ГДК}_i))$, а Φ – інтегральна функція стандартного нормального розподілу. Відносну зміну між підперіодами обчислювали як $\Delta\% = ((P_2 - P_1)/P_1) \times 100$. Таким чином, R відображає сумарний рівень забруднення, а ER – імовірність несприятливого екологічного ефекту.

Нормативною основою інтерпретації результатів були положення Водної рамкової директиви 2000/60/ЄС, Порядку здійснення державного моніторингу вод, Методики визначення масивів поверхневих та підземних вод, Методики віднесення масиву поверхневих вод до одного з класів екологічного та хімічного станів, а також Екологічних нормативів якості води для визначення екологічного стану масиву поверхневих вод [5–9]. У цьому контексті результати розглядали також з позиції ризику недосагнення екологічних цілей для масивів поверхневих вод. Для додаткової оцінки такого ризику використано Методичні рекомендації Держводагентства України щодо визначення основних антропогенних навантажень та їхніх впливів на стан поверхневих вод, які передбачають віднесення масивів поверхневих вод до категорій «без ризику», «можливо під ризиком» і «під ризиком» [29]. Порівняльну класифікацію постів за дослідженими фізико-хімічними показниками виконано відповідно до Методики, затвердженої наказом Мінприроди України від 14.01.2019 № 5, у редакції зі змінами, внесеними наказом Міндовкілля України від 01.04.2024 № 332 [5, 8, 9]. Для природних масивів поверхневих вод застосовано пороги Таблиці 5 Додатку 21, а для кандидатних у істотно змінені масиви поверхневих вод – Додатку 22 [9]. Для розчиненого кисню використовували P10, для БСК₅, NH₄⁺ і PO₄³⁻ – P90; порівняння NH₄⁺ і PO₄³⁻ з нормативами виконували після перерахунку у відповідні форми подання. Для порівняльної оцінки за дослідженими фізико-хімічними показниками застосовано принцип «one out – all out». Повна оцінка екологічного стану у розумінні ВРД потребує також урахування біологічних елементів якості та гідроморфологічного контексту, що виходить за межі цього дослідження.

Включення окремих створів до конкретних аналітичних блоків залежало від безперервності рядів, повноти часових інтервалів і придатності даних для відповідних статистичних процедур.

Пост р. Інгул–Кропивницький розташований нижче впадіння р. Грузька, комунального водовідвідного вузла м. Кропивницький та зони впливу Інгульської шахти, тому його використано як реперний для аналізу часових змін у верхній антропогенно навантажений частині басейну.

Кліматичний контекст басейну р. Інгул визначається помірно-континентальним режимом зі зроста-

ючою посушливістю. Річна сума опадів (566 мм/рік за 1958–2025 рр.) є істотно меншою за потенційне випаровування (790–940 мм/рік), що формує постійний дефіцит вологи і визначає степовий характер річкового стоку.

Коефіцієнт варіації річних сум опадів ($C_v \approx 0,20$) суттєво менший, ніж для річного стоку ($C_v \approx 0,45–0,55$), що свідчить про нелінійну трансформацію кліматичного сигналу гідрологічною системою і визначає непропорційно сильний вплив посушливих циклів на річковий стік.

За даними ряду ERA5-Land (табл. 2), довгострокова динаміка температури в басейні р. Інгул характеризується неухильним, статистично значущим потеплінням із сукупним приростом +3,07 °C за 1958–2025 рр. (тест Манна–Кендалла, $p < 0,001$). Для загальної кліматичної характеристики басейну використано повний ряд 1958–2025, що забезпечує максимально репрезентативну оцінку вікового тренду, тоді як для паралельної верифікації кліматичної та гідрохімічної точок зміни застосовано спільний ряд 1993–2025 – єдиний, що дозволяє коректне порівняння незалежних часових серій.

Узагальнені статистичні параметри кліматичних трендів наведено у табл. 2. У таблиці подано оцінки тренду Сена, р-значення за тестом Манна–Кендалла та результати тесту Петтітта; позначення «н/з» означає незначущу точку зміни ($p > 0,05$). Для ряду 1993–2025 тест Петтітта виявив статистично значущу точку зміни температури у 2006 р. ($p = 0,0006$), а середнє значення температури між підперіодами зросло з 9,52 до 11,08 °C ($\Delta = +1,56$ °C). Екологічно найважливішим є те, що обидва визначальні параметри водного балансу – температура і опади – одночасно змінюються у несприятливому напрямі, формуючи синергетичний ефект аридизації. В умовах степового клімату з багаторічною нормою опадів лише 566 мм/рік навіть помірне скорочення їх кількості у поєднанні зі зростаючим потенційним випаровуванням критично загострює дефіцит вологи та підсилює концентрування розчинених речовин у маловодні роки. Саме це взаємопосилення кліматичних тенденцій, як показують результати аналізу підперіодів, стало важливим рушієм структурного гідрохімічного переходу 2006–2007 рр.

Температурні аномалії та SPI-12 вказують на зміну режиму після 2006 р., що обґрунтовує виділення двох підперіодів для подальшого аналізу (рис. 2).

Таблиця 2

Статистичні характеристики кліматичних трендів і точок зміни в басейні р. Інгул (ERA5-Land)

Кліматичний показник	Часовий ряд	Тренд Сена	p (МК-тест)	Точка зміни	p (Петтітт)
Середньорічна T, °C/рік	1958–2025	+0,045	<0,001	1997 р.	<0,001
Середньорічна T, °C/рік	1993–2025	+0,091 ↑	<0,001	2006 р.	0,0006
Опади, мм/рік	1958–2025	–1,29	0,037	–	н/з ($p=0,129$)
Опади, мм/рік	1993–2025	–3,14	0,049	–	н/з ($p=0,129$)

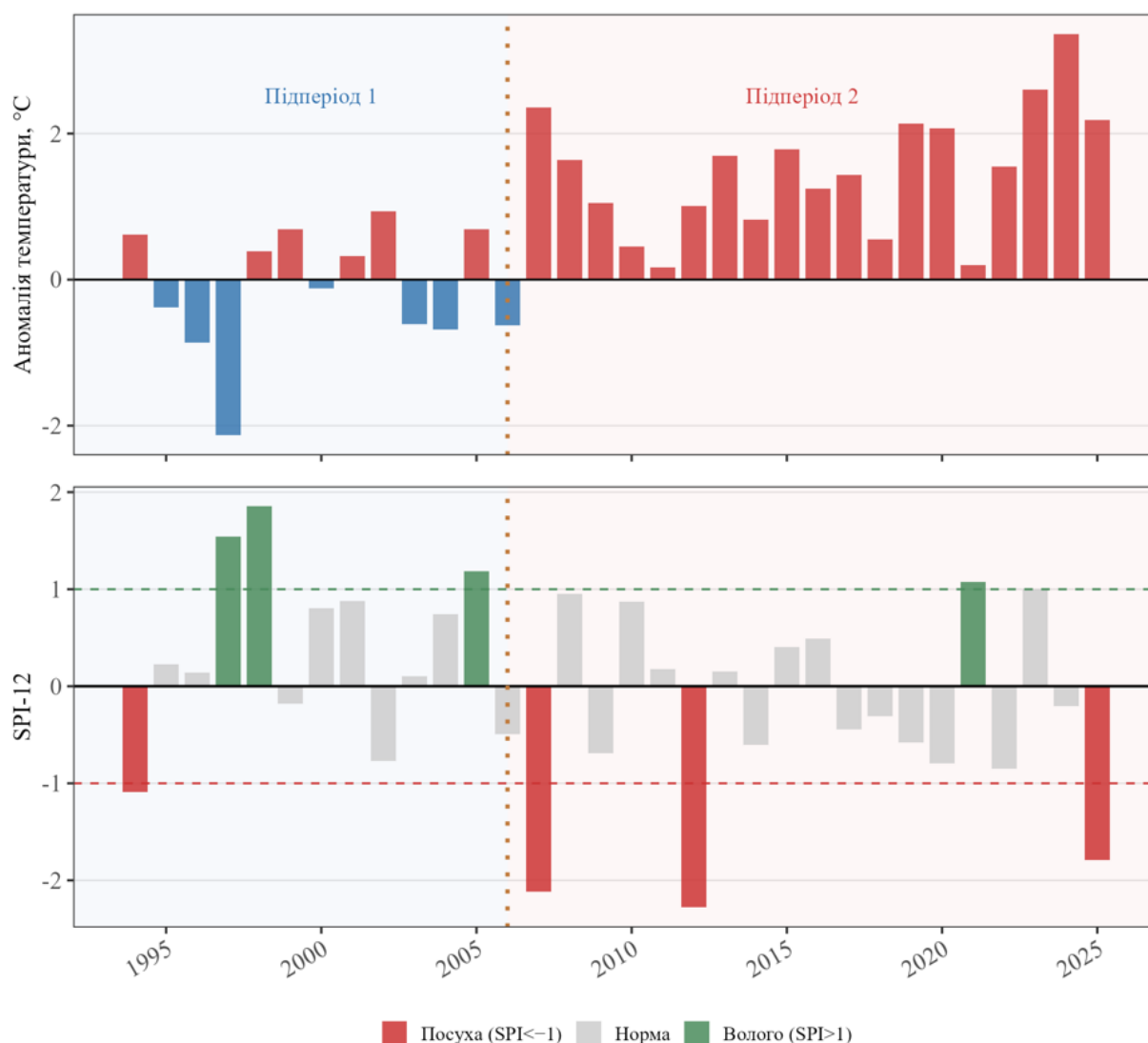


Рис. 2. Температурні аномалії та SPI-12 у басейні р. Інгул у 1994–2025 рр. з виділенням підперіодів до і після точки зміни

Таким чином, кліматичний контекст формує природну вразливість басейну, за якої будь-яке антропогенне навантаження багаторазово підсилюється через механізм концентрування у маловодні роки. З'ясування того, які саме джерела тиску і в яких масштабах визначають сучасну гідроекологічну ситуацію, потребує звернення до кількісних даних про структуру водокористування і скиди зворотних вод у басейні.

Кількісна характеристика антропогенного тиску засвідчує, що загальний водозабір у басейні р. Інгул за 2019–2025 рр. коливається в межах 15,7–19,4 млн м³/рік, а частка підземних вод становить 33–38 %, що свідчить про відносно стабільну структуру водокористування.

Домінування виробничої категорії у структурі водоспоживання (45–67 %) є принциповою рисою сучасного басейнового навантаження: виробничий водозабір зріс з 4,69 до 7,58 млн м³/рік (+17,7 % за

2019–2025), що безпосередньо відображає розширення видобутку на Інгульській шахті. Зрошення у прямому відборі з р. Інгул скоротилося – проте реальний обсяг зрошення через Дніпровський водовід у звітності 2-ТП не відображається, а отже загальний антропогенний вплив на водний баланс є систематично недооціненим.

Аналіз даних форми 2-ТП «водгосп» за 2020–2025 рр. показав виразну асиметрію структури прямих скидів у басейні р. Інгул. У більшості років домінував шахтний дренаж, обсяг якого залишався відносно стабільним і становив близько 2,5–2,6 млн м³/рік; у 2025 р. на нього припадало близько 75 % усіх прямих скидів у басейні. Інші категорії водовідведення – комунальна, теплоенергетична, медична та інші – формували значно менші обсяги. Отже, точкове антропогенне навантаження у верхній частині басейну має концентрований характер.

Дані форми 2-ТП «водгосп» свідчать, що після 2019 р. частка забруднених і недостатньо очищених скидів у басейні р. Інгул різко скоротилася, тоді як у структурі скидів переважали нормативно очищені та нормативно чисті води (рис. 3). Однак цю динаміку слід розглядати як характеристику загального водогосподарського контексту, а не як прямий еквівалент поліпшення якості води, оскільки результати гідрохімічного моніторингу не підтверджують настільки різкого екологічного ефекту.

Дані гідрохімічного моніторингу ДАВР не підтверджують настільки різкого екологічного покращення: у 2020 р. концентрації NH_4^+ залишалися близькими до рівня попередніх років, PO_4^{3-} і надалі хронічно перевищував нормативні значення, а SO_4^{2-} демонстрував стійку тенденцію до зростання. Хронологічний збіг цієї невідповідності з переглядом структури категорій у формі 2-ТП «водгосп» дає підстави розглядати зафіксовані зміни насамперед як імовірний обліковий або адміністративний ефект, а не як доведене екологічне покращення.

За даними 2-ТП «водгосп», шахтні води були головним джерелом мінерального навантаження в басейні р. Інгул і у 2020–2025 рр. формували близько 86–93 % сульфатного та понад 90 % хлоридного навантаження. Натомість фосфатне навантаження не мало настільки вираженої шахтної домінації й більшою мірою було пов'язане з іншими категоріями точкових скидів.

Таким чином, аналіз антропогенного тиску виявляє кілька взаємопов'язаних рис сучасної ситуації: зростання виробничого водозабору на 17,7 %, ознаки адміністративної перекласифікації скидів і просторову асиметрію навантаження, за якої 87–93 % скидів зосереджені у верхній ділянці басейну.

Трансляція цього тиску у гідрохімічний склад річкових вод визначається не лише обсягом антропогенних впливів, а й кліматичними умовами, які задають нелінійну залежність якості води від режиму водності. Саме цю взаємодію і розкриває аналіз точки зміни гідрохімічного режиму.

Просторовий розподіл гідрохімічних показників уздовж основного русла р. Інгул виявляє виразне зростання мінералізаційного навантаження нижче поста Кропивницький, зокрема за сульфатами, концентрація яких між постами P1 і P2 зростає приблизно на 95 мг/дм³ на відрізку 13 км (рис. 4). Пост P2 розташований нижче скиду ДП «СхідГЗК».

Узагальнення частоти перевищення рибогосподарських ГДК показує, що найбільш стійкими проблемними показниками в басейні р. Інгул є сульфати, фосфати та БСК₅, тоді як просторовий контраст між постами найвиразніше проявляється для азотних сполук і розчиненого кисню (рис. 5).

Ключовим аналітичним результатом стало виявлення статистично значущої точки зміни гідрохімічного режиму. Тест Петтітта, застосований до ряду річних медіан R-індексу на посту р. Інгул–Кропивницький (1994–2025, n = 32), виявив статистично значущу точку зміни у 2007 р. (U = 189, p = 0,0009). Ця точка ділить ряд на підперіод 1 (П1: до 2007 р., n = 13) і підперіод 2 (П2: 2007–2025, n = 19). Медіана R-індексу зросла з 2,12 (П1) до 3,04 (П2), тобто на +43 %. На посту р. Інгул–Софіївське вдсх.

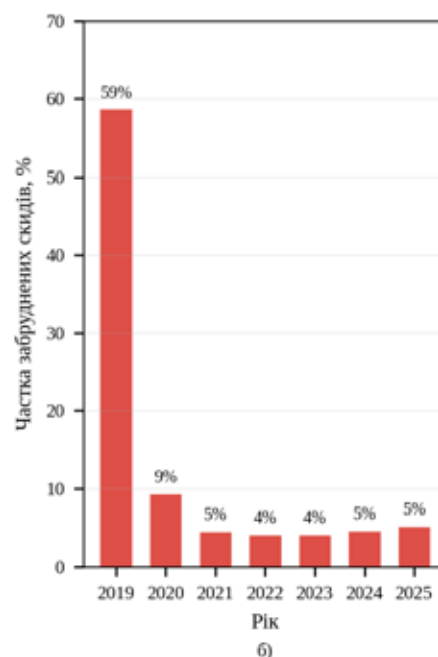
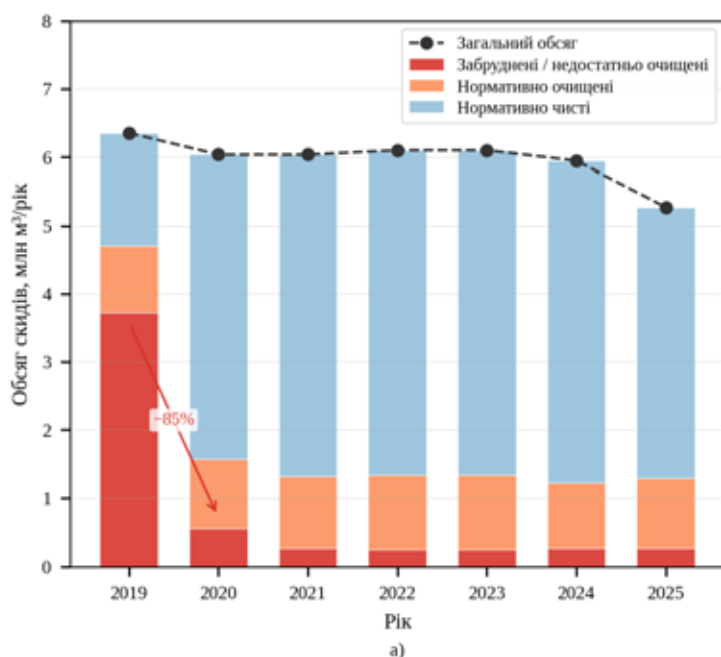


Рис. 3. Динаміка категорій скиду зворотних вод у поверхневі водні об'єкти басейну р. Інгул у 2019–2025 рр.: (а) структура скидів за категоріями; (б) частка забруднених і недостатньо очищених скидів у загальному обсязі

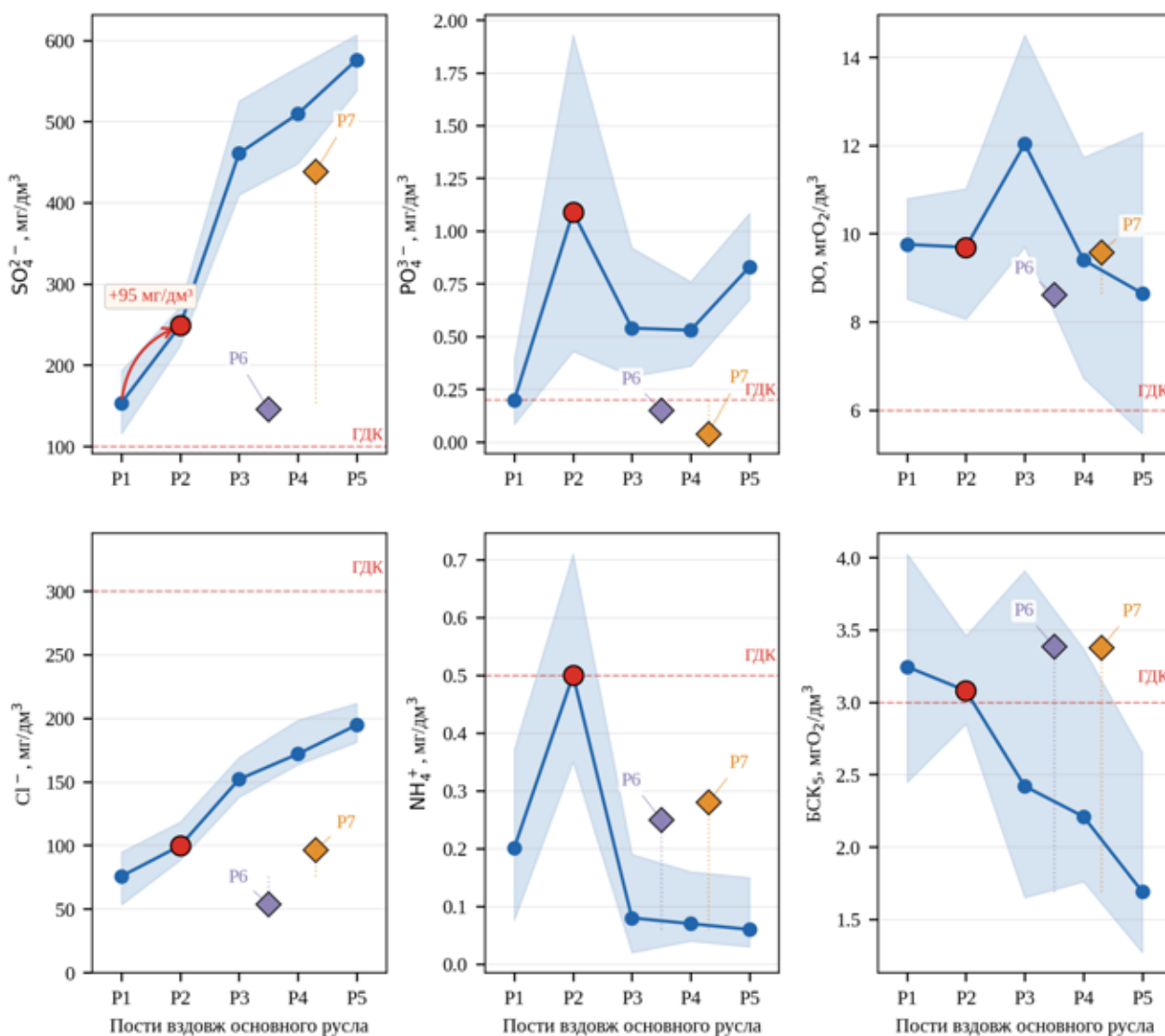


Рис. 4. Просторовий розподіл окремих гідрохімічних показників уздовж основного русла р. Інгул і на притоках у 1993–2025 рр.

Примітка. Синя лінія – медіанні значення на постах основного русла, заштрихована зона – міжквартильний діапазон (P25–P75); пунктирна лінія – рибогосподарська ГДК.

тест не є значущим ($p = 0,129$), що узгоджується з буферним ефектом водосховища, який згладжує кліматичний і антропогенний сигнал.

Незалежна кліматична верифікація підсилює інтерпретацію цього переходу. Тест Петтітта застосовано до ряду середньорічної температури ERA5-Land за спільним із гідрохімічним відрізком 1993–2025. Результат (табл. 2, рядок 2): точка зміни – 2006 р. ($p = 0,0006$), зсув середньої температури між підперіодами $\Delta = +1,56^{\circ}\text{C}$. Розбіжність між кліматичною (2006) і гідрохімічною (2007) точками зміни становить 1 рік і може розглядатися як часово узгоджений перехід. Це не доводить однозначного причинного зв'язку, але переконливо підтримує інтерпретацію про суттєвий кліматичний внесок у перебудову гідрохімічного режиму. Імовірний фізичний механізм полягає у зменшенні водності в тепліші й посушли-

віші роки, що посилює концентрування розчинених речовин, насамперед SO_4^{2-} і Cl^- .

Отже, поділ ряду спостережень на підперіоди П1 (до 2007 р.) і П2 (2007–2025 рр.) є статистично та кліматично верифікованим аналітичним прийомом. Йдеться про структурний перехід системи до іншого гідрохімічного режиму, який найімовірніше сформувався під спільною дією зміни клімату і зростаючого антропогенного навантаження.

Після встановлення моменту структурного переходу наступним кроком є з'ясування природи і масштабу гідрохімічних змін, що відбулися у П2 відносно П1: які показники зазнали статистично значущих зрушень, у якому напрямі і з якою величиною – і чи є ці зміни однорідними вздовж гідрографічного профілю, чи диференційованими за просторовим положенням постів?

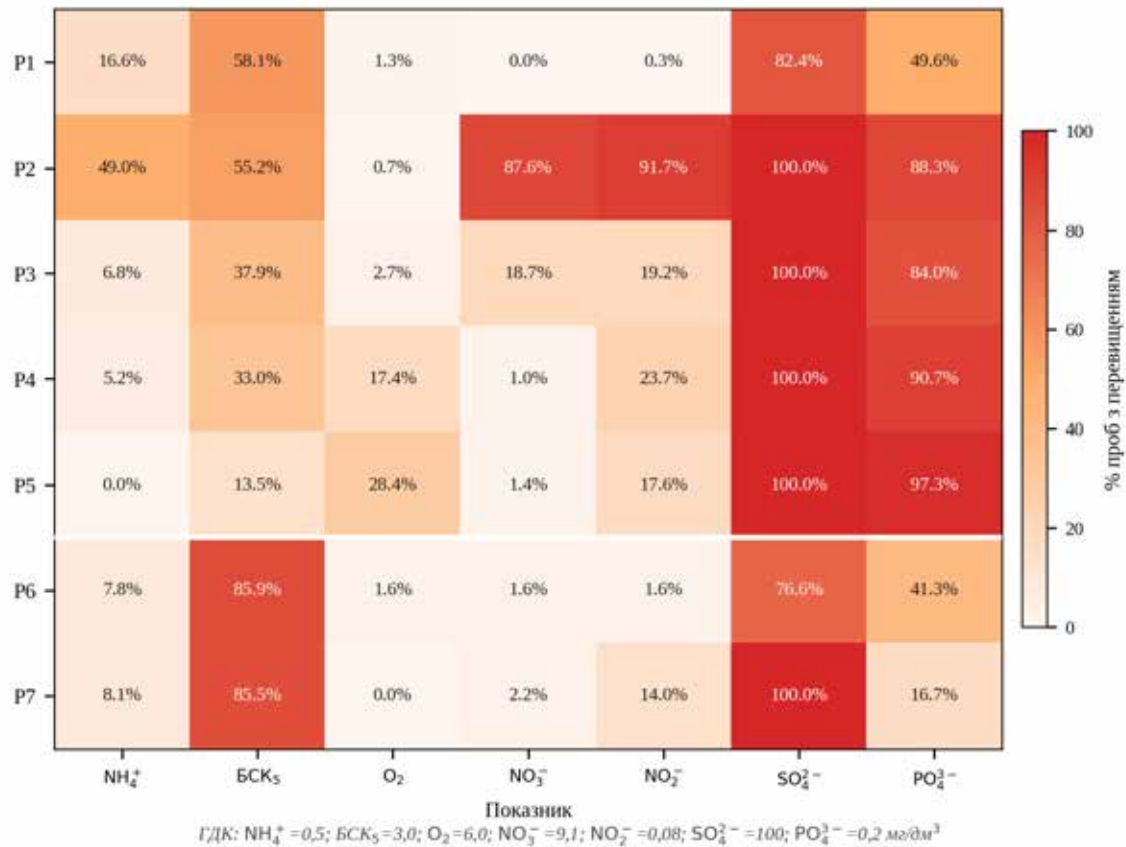


Рис. 5. Частка проб із перевищенням рибогосподарських ГДК за окремими гідрохімічними показниками на постах басейну р. Інгул у 1993–2025 рр.

Порівняння медіанних концентрацій між підперіодами P1 (1994–2006) і P2 (2007–2025) на реперному посту р. Інгул–Кропивницький виконано за критерієм Вілкоксона–Манна–Уїтні; результати наведено в табл. 3. Для PO_4^{3-} інтерпретацію міжперіодних змін здійснювали з обережністю, оскільки регулярний моніторинг цього показника у П1 охоплює лише 2003–2006 рр. Порівняльний аналіз цих підперіодів на постах р. Інгул–Кропивницький і р. Інгул–Софіївське водосховище проілюстровано на рис. 6.

Порівняння підперіодів показує, що після 2006 р. на посту р. Інгул–Кропивницький найвиразніше зросли медіанні концентрації SO_4^{2-} , NO_3^- і Cl^- , тоді як на посту р. Інгул–Софіївське водосховище поряд зі зростанням SO_4^{2-} і PO_4^{3-} спостерігалось зниження NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- і BCK_5 (рис. 6).

Найвиразніше міжпідперіодні відмінності простежуються на реперному посту р. Інгул–Кропивницький, де одночасно проявляються як зрушення у складі домінуючих забруднювачів, так і зміна інтенсивності антропогенного впливу. Саме тому подальший аналіз зосереджено на показниках, що визначають екологічний профіль підперіоду 2.

Провідною і найбільш екологічно значущою трансформацією є зростання SO_4^{2-} (табл. 3): медіана у П2 вдвічі перевищує рибогосподарське ГДК,

а в посушливі роки – утричі. Важливо, що зростання SO_4^{2-} у часі узгоджується зі збільшенням виробничого водозабору СхідГЗК за даними 2-ТП «водгосп», що вказує на істотну роль шахтних вод у формуванні мінерального профілю забруднення.

Одним із головних лімітуючих чинників сучасного стану басейну залишається фосфатне навантаження: більш ніж у 80 % проб з 2002 р. концентрації PO_4^{3-} перевищують нормативні значення, що може бути пов'язано з відсутністю на комунальних очисних спорудах повноцінного вузла видалення фосфору. Саме тому за правилом «one out – all out» цей показник істотно погіршує узагальнену оцінку поста р. Інгул–Кропивницький. Водночас статистично значуще зниження медіани PO_4^{3-} між підперіодами П1 і П2 слід інтерпретувати з обережністю, оскільки регулярний моніторинг цього показника в ранньому підперіоді охоплює лише 2003–2006 рр. і не формує повністю однорідної основи для прямого міжперіодного зіставлення.

NH_4^+ демонструє лише помірне зростання (табл. 3; +11,5 %), однак воно не є статистично значущим ($p = 0,135$), тому однозначних ознак посилення або послаблення амонійного навантаження у верхній частині басейну за даними міжпідперіодного порівняння не виявлено.

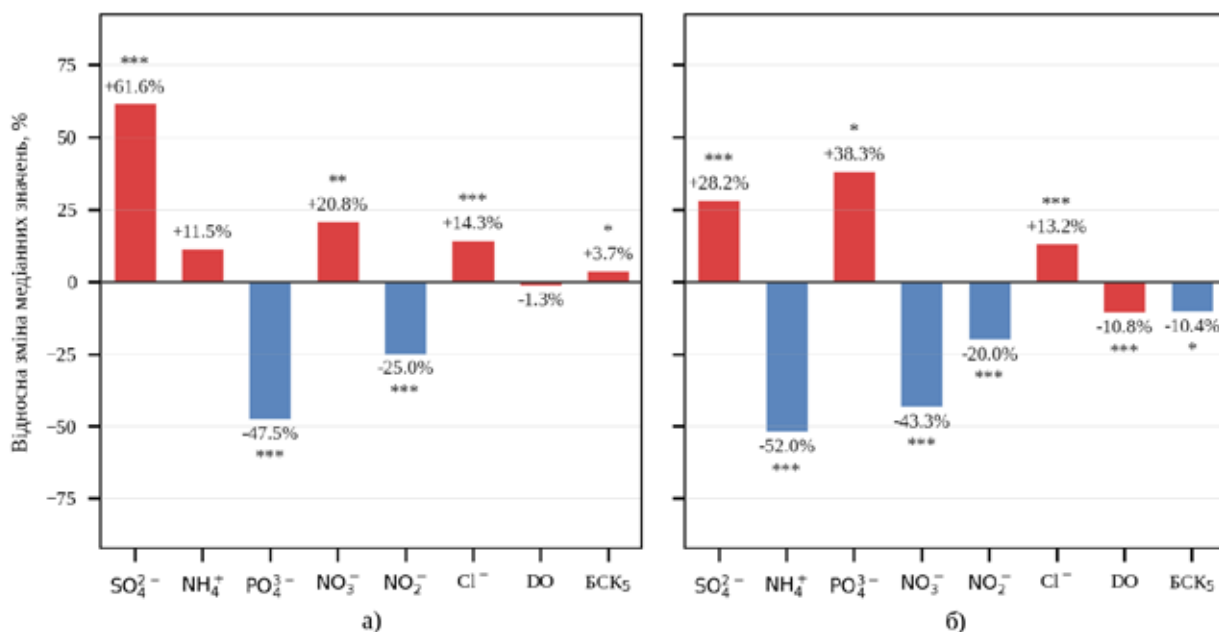


Рис. 6. Відносна зміна медіанних значень гідрохімічних показників між підперіодами П1 (1994–2006) і П2 (2007–2025) на постах: (а) р. Інгул–Кропивницький; (б) р. Інгул–Софіївське водосховище

Примітка. Червоним кольором позначено несприятливі зміни, синім – сприятливі зміни якості води. *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$.

Таблиця 3

Порівняння медіанних концентрацій гідрохімічних показників між підперіодами П1 і П2 на посту р. Інгул–Кропивницький (тест Вілкоксона–Манна–Уїтні)

Показник	ГДК [28]	П1, мг/дм ³ (n)	П2, мг/дм ³ (n)	Δ , %	p	Значимість
SO_4^{2-}	100	112,0 (149)	181,0 (220)	+61,6	<0,001	***
NH_4^+	0,50	0,260 (150)	0,290 (230)	+11,5	0,135	н/з
PO_4^{3-}	0,20	0,400 (46)	0,210 (230)	-47,5	<0,001	***
NO_3^-	9,10	0,890 (136)	1,075 (230)	+20,8	0,003	**
NO_2^-	0,08	0,040 (141)	0,030 (230)	-25,0	<0,001	***
Cl^-	300	62,3 (149)	71,2 (220)	+14,3	<0,001	***
DO	$\geq 6,0$	9,585 (150)	9,460 (230)	-1,3	0,643	н/з
BCK_5	3,00	3,200 (147)	3,320 (230)	+3,7	0,027	*

На посту р. Інгул–Софіївське вдсх. виявляється принципово відмінний і внутрішньо суперечливий патерн: частина азотно-органічних показників поліпшилася (NH_4^+ –52,0 %, NO_3^- –43,3 %, NO_2^- –20,0 %, BCK_5 –10,4 %), тоді як мінеральне навантаження зросло (SO_4^{2-} +28,2 %, PO_4^{3-} +38,3 %, Cl^- +13,2 %), а розчинений кисень знизився на 10,8 %. Ця гідрохімічна дихотомія розкриває трансформаційну функцію водосховища як специфічного біогеохімічного вузла: акумуляція завислих речовин і гідролітична деструкція органіки у водній товщі та донних відкладах редукують азотно-органічне навантаження, формуючи видиме покращення за цими показниками; водночас розчинені мінеральні іони, позбавлені ефективних механізмів затримки, безперешкодно транспортуються

у нижню частину русла і поступово накопичуються вниз за течією.

На ділянці основного русла просторовий профіль мінерального навантаження простежується у послідовності 318→305→163→110→103 км від гирла. Пост р. Інгул–Первозванівка, розташований нижче зони впливу Інгульської шахти, кількісно фіксує локальний приріст SO_4^{2-} на відрізку між Кропивницьким і Первозванівкою: медіана зростає з 155 до 249 мг/дм³, тобто на 94 мг/дм³ за 13 км, що узгоджується з впливом шахтних вод на мінеральне навантаження р. Інгул. Нижче за течією, у Софіївському водосховищі та на посту р. Інгул–Привільне, зберігається підвищений рівень мінеральних солей, а на нижньому русловому посту р. Інгул–Одрадне (103 км від гирла; ряд з 2019 р.) фік-

сується кумулятивний підсумок верхньо- та середньобасейнових впливів. У посушливі роки тут загальна мінералізація сягає 1 200–1 600 мг/дм³, що відповідає слабосолонуватим водам. Пост р. Сугоклія–Бобринець, репрезентативний для правої притоки з переважно аграрним водозбором, вирізняється стабільно підвищеним NO₃⁻ (1,2–2,5 мг/дм³) і помірним SO₄²⁻ (80–120 мг/дм³), тоді як пост р. Грузька–Лелеківське вдсх. утримує відносно вищу якість вод у системі завдяки буферній функції водосховища та верхньому положенню у водозборі.

Сезонний аналіз уточнює механізми виявлених змін. На нижньому русловому посту р. Інгул–Одрадне в серпні–вересні в окремі роки вміст розчиненого кисню знижується до 2–3 мг/дм³, що відповідає періодам найвищої екологічної напруги в нижній течії. Для Софіївського водосховища характерне підвищення PO₄³⁻ у літньо-осінній період, що узгоджується з посиленням евтрофного ризику та ймовірним внеском внутрішнього навантаження за умов прогрівання водної товщі. Після відновлення спостережень на посту р. Інгул–Привільне у 2023–2025 рр. медіана SO₄²⁻ зросла до 576 мг/дм³, що свідчить про збереження високого мінерального навантаження в нижній течії.

Розглянуті тренди та міжперіодні відмінності окремих гідрохімічних показників становлять необхідну, але недостатню основу для управлінських висновків. Подальший аналіз спрямовано на

з'ясування того, наскільки сучасний стан р. Інгул за дослідженими фізико-хімічними показниками відповідає екологічним цілям ВРД та яким є узагальнений рівень екологічного ризику для водних екосистем.

Інтегральну оцінку сучасного стану річкової системи виконано на основі класифікації усіх постів за дослідженими фізико-хімічними показниками (табл. 4), додаткової оцінки ризику недосягнення екологічних цілей за методичними рекомендаціями Держводагентства (табл. 5) та аналізу часової динаміки ER-індексу.

Розподіл проб за класами показує, що для розчиненого кисню та NH₄⁺ на більшості постів переважають класи I–II, тоді як найбільша частка проб класу III характерна для БСК₅, а особливо для PO₄³⁻ (рис. 7).

Часова динаміка ER-індексу відображає перехід від значень, характерних для підперіоду 1, до закріплення у вищих класах ризику в підперіоді 2 з чітким виділенням посухових максимумів. Додаткова інтерпретація річних значень ER у термінах трофічного стану свідчить про переважання мезотрофних характеристик на постах із підвищеним біогенним навантаженням, що узгоджується з роллю фосфатів і амонійного азоту як лімітуючих показників ризику.

Результати класифікації, наведені у табл. 4, засвідчують, що за дослідженими фізико-хімічними показниками всі сім постів віднесено до класу III (задовільний) за принципом «one out – all out». Отже,

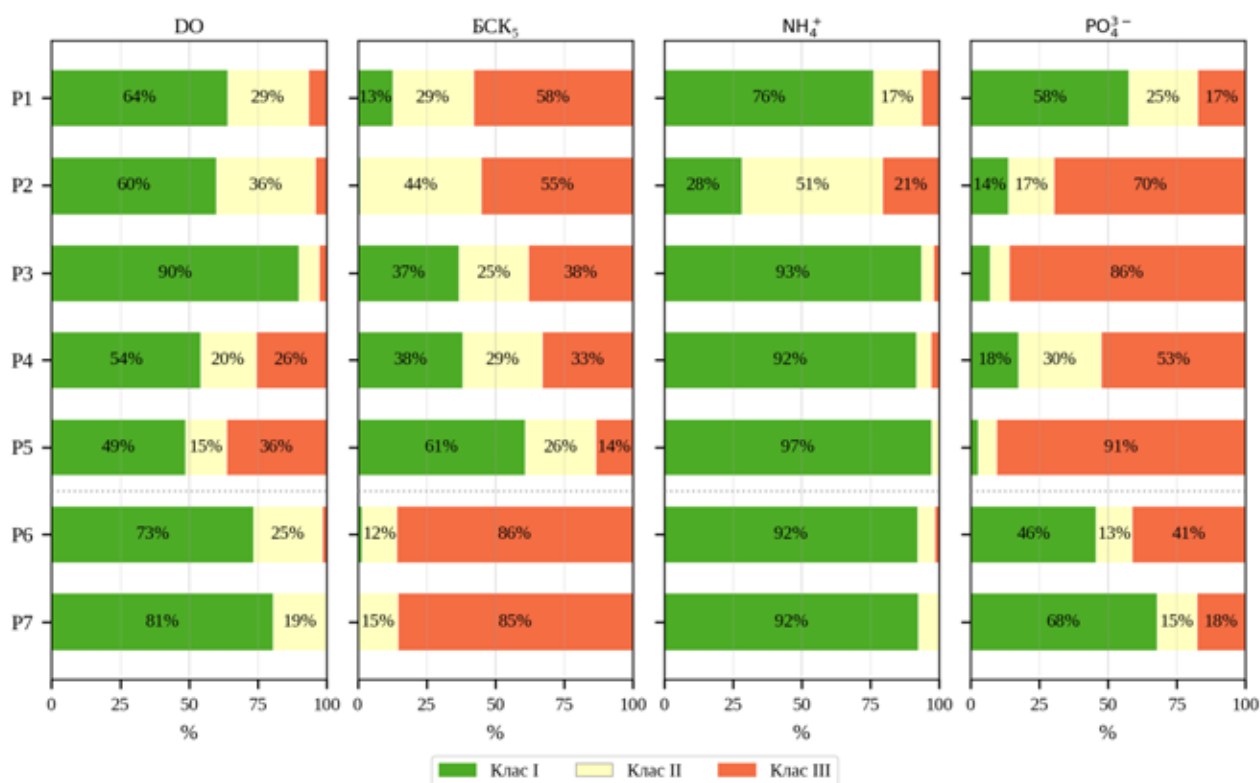


Рис. 7. Розподіл проб за класами I–III за окремими фізико-хімічними показниками на постах басейну р. Інгул

Таблиця 4

Класифікація постів за дослідженими фізико-хімічними показниками

Пост	Тип МПВ	DO	БСК ₅	NH ₄ ⁺	PO ₄ ³⁻	Підсумковий клас
р. Інгул–Кропивницький	Річка	II	III	II	III	III
р. Інгул–Первозванівка	Річка	II	III	III	III	III
р. Інгул–Софіївське вдсх.	кІЗМПВ	I	III	I	III	III
р. Інгул–Привільне	Річка	III	III	I	III	III
р. Інгул–Одрядне	Річка	III	III	I	III	III
р. Грузька–Лелеківське вдсх.	кІЗМПВ	II	III	I	III	III
р. Сугоклія–Бобринець	ІЗМПВ	II	III	I	III	III

Таблиця 5

Оцінка ризику недосягнення екологічних цілей
(методичні рекомендації Держводагентства України, Додаток 3 [29])

Пост	Тип	DO P10 (% нас.)	БСК ₅ P90	NH ₄ ⁺ P90	NH ₄ ⁺ сер.	PO ₄ ³⁻ сер.	Лімітуючий показник
р. Інгул–Кропивницький	сер.	84,8	4,05	0,500	0,33	0,32	NH ₄ ⁺ , PO ₄ ³⁻
р. Інгул–Первозванівка	сер.	84,4	4,38	1,236	0,673	1,298	NH ₄ ⁺ , PO ₄ ³⁻
р. Інгул–Софіївське вдсх.	сер.	88,6	5,57	0,380	0,158	0,621	PO ₄ ³⁻
р. Інгул–Привільне	сер.	53,4	4,70	0,296	0,133	0,554	DO, PO ₄ ³⁻
р. Інгул–Одрядне	сер.	41,4	3,15	0,220	0,094	0,866	DO, PO ₄ ³⁻
р. Грузька–Лелеківське вдсх.	мала	81,0	4,22	0,477	0,302	0,250	NH ₄ ⁺ , PO ₄ ³⁻
р. Сугоклія–Бобринець	мала	82,4	3,82	0,485	0,292	0,092	NH ₄ ⁺

жоден із постів не досягає класу II, який відповідає екологічній цілі ВРД.

Структура лімітуючих показників при цьому відрізняється між постами. Для руслових створів верхньої та нижньої частини басейну головними обмеженнями є БСК₅ і PO₄³⁻, тоді як для Первозванівки додатково зберігається внесок NH₄⁺, а для Софіївського водосховища та притоків постів клас III визначається насамперед фосфатним навантаженням.

Додаткову оцінку ризику недосягнення екологічних цілей виконували відповідно до методичних рекомендацій Держводагентства України (Додаток 3) за показниками DO P10 (% насичення), БСК₅ P90, NH₄⁺ P90, NH₄⁺ (середнє) та PO₄³⁻ (середнє). Для середніх річок застосовано пороги DO ≥ 70 %, БСК₅ ≤ 6 мг/дм³, NH₄⁺ P90 ≤ 0,6 мг/дм³, NH₄⁺ сер. ≤ 0,2 мг/дм³, PO₄³⁻ сер. ≤ 0,3 мг/дм³; для малих річок – відповідно DO ≥ 75 %, БСК₅ ≤ 5 мг/дм³, NH₄⁺ P90 ≤ 0,4 мг/дм³, NH₄⁺ сер. ≤ 0,15 мг/дм³, PO₄³⁻ сер. ≤ 0,2 мг/дм³. Узагальнені результати наведено в табл. 5.

Результати цієї оцінки показали, що всі сім постів належать до категорії «під ризиком». Для більшості постів лімітуючими показниками виступають PO₄³⁻ і NH₄⁺, а для Привільного й Одрядного ризик додатково посилюється дефіцитом кисню. Поєднання ВРД-орієнтованої класифікації, за якою всі пости залишаються на рівні класу III, та управлінської оцінки ризику формує узгоджену доказову основу

для пріоритизації водоохоронних дій у басейні р. Інгул.

Результати, наведені в табл. 5, показують, що навіть за задовільного класу за дослідженими фізико-хімічними показниками всі сім постів зберігають ризик недосягнення екологічних цілей. Це означає, що існуючий стан системи не можна вважати стабільним у довгостроковому управлінському сенсі.

Практичний висновок полягає в тому, що пріоритетні водоохоронні дії мають бути спрямовані насамперед на зменшення фосфатного та амонійного навантаження, а для нижньої течії – також на обмеження сезонного дефіциту кисню. Саме ці показники виступають головними лімітуючими чинниками ризику для більшості постів мережі.

Виявлені просторово-часові особливості якості води та структури антропогенного навантаження дали змогу обґрунтувати пріоритетні напрями водоохоронних заходів, узагальнені в табл. 6.

Реалістичним стратегічним орієнтиром є покращення до класів II–III за ключовими фізико-хімічними показниками з чіткою позитивною динамікою. Це обмеження пов'язане не лише з управлінськими рішеннями, а й з природним геохімічним фоном Українського кристалічного щита, який може підтримувати підвищені концентрації сульфатів навіть після реалізації природоохоронних заходів. Урахування цього фону є необхідною передумовою науково обґрунтованого регулювання.

Таблиця 6

Пріоритетні водоохоронні заходи, обґрунтовані результатами дослідження

Напрямок водоохоронних дій	Очікуваний ефект	Горизонт реалізації
Модернізація комунальних очисних споруд для зменшення біогенного навантаження у верхній частині басейну	Зменшення надходження NH_4^+ і PO_4^{3-} та обмеження ризику евтрофікації	Середньостроковий (до 2030 р.)
Посилення контролю шахтних вод і умов їх відведення для послаблення сульфатно-хлоридного навантаження	Обмеження мінеральної деградації та зниження внеску SO_4^{2-} і Cl^-	Середньостроковий (2026–2030)
Забезпечення мінімальних екологічних попусків для послаблення концентрування забруднювачів у межень	Послаблення ефекту концентрування забруднювачів у маловодні роки	Короткостроковий (2025–2027)
Відновлення водоохоронних смуг і локальні басейнові заходи на притоках для зменшення дифузного надходження біогенів	Зменшення дифузного навантаження та стабілізація якості води	Середньостроковий (2026–2030)
Уточнення водоохоронних пріоритетів у ПУРБ Південного Бугу на 2027–2033 рр. та узгодження руслового моніторингу р. Інгул з даними 2-ТП «водгосп»	Підвищення обґрунтованості управлінських рішень і пріоритизації заходів	Короткостроковий (2026–2027)

Для оцінки ефективності реалізації заходів доцільно використовувати систему ключових індикаторів: NH_4^+ (P90) < 0,50 мг/дм³ і PO_4^{3-} (P90) < 0,20 мг/дм³ на посту Кропивницький; SO_4^{2-} (медіана) < 200 мг/дм³; меженна витрата $Q \geq 1,8$ м³/с; $ER \leq 0,45$. Для ділянки нижче потенційного впливу шахтних скидів до програми моніторингу доцільно додати контроль ^{238}U та ^{226}Ra не рідше чотирьох разів на рік.

Таким чином, отримані результати засвідчують, що сучасний стан р. Інгул формується під поєднаною дією кліматично зумовленого зростання аридності та тривалого антропогенного навантаження, насамперед мінерального. Саме така комбінація чинників пояснює перехід системи до більш ризикованого гідрохімічного режиму після 2006–2007 рр. і водночас обґрунтовує пріоритетність заходів, спрямованих не лише на зниження комунального, а й на регулювання шахтного та дифузного впливу.

Висновки. Проведене дослідження дало змогу виявити ключові просторово-часові закономірності зміни якості води р. Інгул, оцінити рівень екологічного ризику та обґрунтувати пріоритетні напрями водоохоронних дій у басейні.

На реперному посту р. Інгул–Кропивницький, розташованому нижче основних комунальних і шахтних джерел навантаження верхньої частини басейну, встановлено статистично значущу точку зміни гідрохімічного режиму у 2007 р. ($p = 0,0009$), а на спільному кліматичному ряді ERA5-Land 1993–2025 – точку зміни температури у 2006 р. ($p = 0,0006$). Їх близькість у часі підтримує висновок про вагомий кліматичний внесок у перебудову гідрохімічного режиму, але не підміняє причинно-наслідкового аналізу.

Провідним чинником погіршення якості вод після 2007 р. є мінеральне навантаження: SO_4^{2-} зріс

на +61,6 % ($p < 0,001$), що узгоджується зі збільшенням виробничого водозбору ДП «СхідГЗК» (+17,7 %) і посиленням ефекту концентрування у маловодні роки. Додатковим просторовим доказом шахтного впливу є пост р. Інгул–Первозванівка, де медіана SO_4^{2-} зростає з 155 до 249 мг/дм³ на відрізьку 13 км нижче Кропивницького. Отже, поряд із комунальним блоком саме шахтні води слід розглядати як один із ключових чинників деградації.

PO_4^{3-} хронічно перевищує рибогосподарське ГДК у значній частині проб і разом з NH_4^+ залишається одним із головних лімітуючих чинників сучасного стану басейну. За дослідженими фізико-хімічними показниками всі сім постів віднесено до класу III (задовільний), але жоден із них не досягає класу II, який відповідає екологічній цілі ВРД. Додаткова оцінка ризику показала, що всі сім постів належать до категорії «під ризиком», а для Привільного й Одрядного ризик додатково посилюється дефіцитом кисню.

Виявлено ознаки адміністративної перекласифікації «забруднених» скидів у «нормативно чисті» у звітності 2-ТП «водгосп» (2019→2020): зменшення на 3,166 млн м³ супроводжується зростанням «нормативно чистих» на 2,619 млн м³ при майже незмінному загальному скиді (6,353→6,036 млн м³). Заявлене «покращення» не підтверджується даними гідрохімічного моніторингу ДАВР.

Поєднання ВРД-орієнтованої класифікації та оцінки ризику недосягнення екологічних цілей показує необхідність пріоритетних водоохоронних дій, спрямованих насамперед на зменшення фосфатного й амонійного навантаження, а для нижньої течії – також на послаблення сезонного дефіциту кисню. Саме ці напрями є ключовими для покращення стану водних масивів у середньостроковій перспективі.

Перспективи використання результатів дослідження. Одержані результати можуть бути використані під час оновлення ПУРБ Південного Бугу на 2027–2033 рр. в частині басейну р. Інгул, обґрунтування реконструкції КОС м. Кропивницький у рамках програм відновлення водної інфраструктури, удосконалення підходів до регулювання шахтних скидів і моніторингу нижче впливу СхідГЗК, а також для верифікації даних 2-ТП «водгосп» шляхом зіставлення з незалежним гідрохімічним моніторингом. Наступним етапом досліджень має стати доповнення аналізу біологічними елементами якості, що дозволить перейти від оцінки за фізико-хімічними показниками до пов-

нішої характеристики екологічного стану у розумінні ВРД.

Запропонована процедура паралельної верифікації гідрохімічних точок зміни незалежними кліматичними рядами на спільному часовому відрізку є методологічно відтворюваною і може бути використана при розробленні ПУРБ для річкових систем аридної зони України. Серед пріоритетних напрямів подальших досліджень доцільно виділити просторове моделювання трендів якості вод на рівні окремих масивів поверхневих вод, прогнозування гідрохімічних станів до 2050 р. за кліматичними сценаріями та кількісну оцінку можливих радіологічних ризиків.

Література

1. Хільчевський В. К., Осадчий В. І., Курило С. М. Регіональна гідрохімія України. Київ : ВПЦ «Київський університет», 2019. 343 с.
2. Хільчевський В. К., Чунарьов О. В., Ромась М. І. та ін. Водні ресурси та якість річкових вод басейну Південного Бугу. Київ : Ніка-Центр, 2009. 184 с.
3. Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A. et al. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*. 2021. Vol. 13. P. 4349–4383. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>
4. Whitehead P. G., Wilby R. L., Battarbee R. W. et al. A review of the potential impacts of climate change on surface water quality. *Hydrological Sciences Journal*. 2009. Vol. 54, No. 1. P. 101–123. DOI: <https://doi.org/10.1623/hysj.54.1.101>
5. Про затвердження екологічних нормативів якості води для визначення екологічного стану масиву поверхневих вод та Змін до деяких нормативно-правових актів Міністерства екології та природних ресурсів України : наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 01.04.2024 № 332. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0789-24> (дата звернення: 27.03.2026).
6. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Official Journal of the European Communities*. 2000. L 327. P. 1–73. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/994_962 (дата звернення: 28.03.2026).
7. Про затвердження Порядку здійснення державного моніторингу вод : постанова Кабінету Міністрів України від 19.09.2018 № 758. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/758-2018-p> (дата звернення: 28.03.2026).
8. Про затвердження Методики визначення масивів поверхневих та підземних вод : наказ Міністерства екології та природних ресурсів України від 14.01.2019 № 4. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0287-19#Text> (дата звернення: 28.03.2026).
9. Про затвердження Методики віднесення масиву поверхневих вод до одного з класів екологічного та хімічного станів масиву поверхневих вод, а також віднесення штучного або істотно зміненого масиву поверхневих вод до одного з класів екологічного потенціалу штучного або істотно зміненого масиву поверхневих вод : наказ Міністерства екології та природних ресурсів України від 14.01.2019 № 5. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0127-19#Text> (дата звернення: 28.03.2026).
10. Про схвалення Водної стратегії України на період до 2050 року : розпорядження Кабінету Міністрів України від 09.12.2022 № 1134-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1134-2022-%D1%80#Text> (дата звернення: 11.10.2025).
11. Про затвердження планів управління річковими басейнами Вісли, Дністра та Південного Бугу на 2025–2030 роки : розпорядження Кабінету Міністрів України від 01.11.2024 № 1078-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1078-2024-%D1%80> (дата звернення: 28.03.2026).
12. Про затвердження обласної Програми «Питна вода Миколаївщини» на 2021–2025 роки : рішення Миколаївської обласної ради від 29.09.2021 № 4. URL: <https://mk-oblrada.gov.ua/UserFiles/decree/1633434255615c3a8f16115.pdf> (дата звернення: 11.10.2025).
13. Про затвердження Комплексної програми охорони довкілля Миколаївської області на 2021–2027 роки : рішення Миколаївської обласної ради від 23.12.2020 № 16. URL: <https://www.mk-oblrada.gov.ua/UserFiles/decree/16111249526007d0d8091a5.pdf> (дата звернення: 11.10.2025).
14. Осадчий В. І., Набиванець Б. Й., Осадча Н. М., Набиванець Ю. Б. Гідрохімія суходільних вод України. Київ : Ніка-Центр, 2017. 316 с.
15. Mann H. B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*. 1945. Vol. 13, No. 3. P. 245–259. DOI: <https://doi.org/10.2307/1907187>
16. Sen P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*. 1968. Vol. 63, No. 324. P. 1379–1389. DOI: <https://doi.org/10.2307/2285891>
17. Pettitt A. N. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*. 1979. Vol. 28, No. 2. P. 126–135. DOI: <https://doi.org/10.2307/2346729>
18. Лобода Н. С., Куза А. М. Оцінка екологічних ризиків забруднення біогенними речовинами річки Когильник на основі пробіт-функцій. *Укр. гідрометеорол. журнал*. 2023. № 32. С. 34–49. DOI: <https://doi.org/10.31481/uhmj.32.2023.03>

19. Лобода Н. С., Божок Ю. В. Вплив кліматичних змін на водні ресурси Північно-Західного Причорномор'я у сценарних умовах (за RCP4.5 та RCP8.5). Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. 2016. Т. 2. С. 48–58. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/glghge_2016_2_5 (дата звернення: 29.03.2026).
20. Романенко В. Д., Жукинський В. М., Оксіюк О. П. та ін. Методика екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями. Київ : Символ-Т, 2001. 37 с.
21. Spinoni J., Naumann G., Vogt J. V. Pan-European seasonal trends and recent changes of drought frequency and severity. *Global and Planetary Change*. 2017. Vol. 148. P. 113–130. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.11.013>
22. Salmaso N., Boscaini A., Capelli C. et al. Ongoing ecological shifts in a large deep lake are driven by a new climate regime. *Hydrobiologia*. 2018. Vol. 824. P. 73–87. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10750-018-3533-5>
23. Copernicus Land Monitoring Service. CORINE Land Cover 2018 (raster 100 m), Europe, 6-yearly. DOI: <https://doi.org/10.2909/60998c1-1870-4e82-8051-6485205ebbac>
24. ДАВР України. Моніторинг та екологічна оцінка водних ресурсів України : веб-ресурс. URL: <https://monitoring.davr.gov.ua/> (дата звернення: 15.03.2026).
25. ДАВР України. Державний облік водокористування : офіційний веб-ресурс. URL: <https://www.davr.gov.ua/derzhavnij-oblik-vodokoristuvannya> (дата звернення: 15.03.2026).
26. Wickham H., Averick M., Bryan J. et al. Welcome to the tidyverse. *Journal of Open Source Software*. 2019. Vol. 4, No. 43. P. 1686. DOI: <https://doi.org/10.21105/joss.01686>
27. Pohlert T. trend: Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection. R package version 1.1.6. 2023. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=trend> (дата звернення: 15.03.2026).
28. Про затвердження Нормативів екологічної безпеки водних об'єктів, що використовуються для потреб рибного господарства, щодо ГДК органічних та мінеральних речовин у морських та прісних водах : наказ Міністерства аграрної політики та продовольства України від 30.07.2012 № 471. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z1369-12> (дата звернення: 29.03.2026).
29. Методичні рекомендації щодо визначення основних антропогенних навантажень та їхніх впливів на стан поверхневих вод / Вихрист С., Мудра К., Осійський Е., та ін. Держводагенство, 2018. 21 с URL: <https://www.davr.gov.ua/fls18/mvod1.pdf>

Дата першого надходження статті до видання: 31.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

ВОДЯНІ РОСЛИНИ ТА ЇХ РОЛЬ В ЕКОЛОГІЧНІЙ ТА РАДІАЦІЙНІЙ ЄМНОСТІ ВОДОЙМ ПІВДЕННО-БУЗЬКОЇ РІЧКОВОЇ ЕКОСИСТЕМИ

Остапенко В.В., Веселовський Д.М., Макарова О.В., Григор'єва Л.І.

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

вул. 68 Десантників, 10, 54003, м. Миколаїв

ludmila.grygorieva@chmnu.edu.ua

Водяна біота, зокрема водяна рослинність, дуже чутливо реагує на хімічний та радіонуклідний склад водоймищ, в яких вона зростає. Цю її якість часто використовують для індикації рівня забруднення водного середовища хімічними та радіонуклідними поллютантами. Стаття присвячена дослідженню акумуляційних властивостей водяних рослин пониззя р. Південний Буг та Бузького лиману. Проаналізовано матеріали радіометрії та мас-спектрометрії, виконаних у 2007 р., 2015 р., 2021 р., 2024 р., проб водяних рослин: нитчасті водорості (*Cladophora fracta*), рдест (*Potamogeton perfoliatus*, *Potamogeton natans*), елодея (*Elodea canadensis*) та інших водоростей, які масово зустрічаються у нижній течії Південного Бугу і в прибережних зонах лиману. Вони входять до складу перифітону та епіфітону на каменях, коренях макрофітів і донних субстратах.

Показано, що коефіцієнти акумуляції радіонуклідів водяними рослинами пониззя р. Південний Буг та Бузького лиману становили: для ^{90}Sr – $40 \div 1020$, для ^{137}Cs – $60 \div 1680$. Найбільшими коефіцієнти акумуляції характерні для нитчастих водоростей (*Cladophora fracta*) та рдеста (*Potamogeton perfoliatus*, *Potamogeton natans*): за ^{137}Cs – до 1680 л/кг, за ^{90}Sr – до 1020 л/кг. Для Бузького лиману та Ташликського водосховища, води яких відзначаються більшою солоністю та мінералізацією, коефіцієнти акумуляції радіонуклідів макрофітами є від 2-х разів меншими. Для нитчастих водоростей (*Cladophora fracta*), рдеста (*Potamogeton perfoliatus*, *Potamogeton natans*), елодея (*Elodea canadensis*) отримано високі (≤ 9) коефіцієнти біологічного поглинання Pb, Zn; чималі коефіцієнти біологічного поглинання (≤ 1) для Cd, Cr. Для акваторії пониззя р. Південний Буг та Бузького лиману нитчасті водорості (*Cladophora fracta*), рдест (*Potamogeton perfoliatus*, *Potamogeton natans*), елодея (*Elodea canadensis*) можуть виступати як біоіндикатори якості води та як компоненти фітореMediaційних систем при очищенні від радіоактивних речовин та важких металів. **Ключові слова:** водойми, вода водойм, водяні рослини, забруднення, коефіцієнти акумуляції, коефіцієнти біологічного поглинання, радіонукліди, важкі метали, Південний Буг, Бузький лиман.

Accumulation of chemical and radionuclide pollutants by aquatic plants in the Southern Buzka river ecosystem. Ostapenko V., Veselovsky D., Makarova E., Grygorieva L.

Aquatic biota, particularly aquatic vegetation, is highly sensitive to the chemical and radionuclide composition of the water bodies in which it grows. This characteristic is often used to indicate the level of contamination of the aquatic environment by chemical and radionuclide pollutants. The article is devoted to the study of the accumulation properties of aquatic plants in the lower reaches of the Southern Bug River and the Bug Estuary. The materials of radiometry and mass spectrometry performed in 2007, 2015, 2021, 2024, samples of aquatic plants: filamentous algae (*Cladophora fracta*), pondweed (*Potamogeton perfoliatus*, *Potamogeton natans*), elodea (*Elodea canadensis*) and other algae that are commonly found in the lower reaches of the Southern Bug and in the coastal areas of the estuary. They are part of the periphyton and epiphyton on stones, macrophyte roots and bottom substrates.

It has been shown that the accumulation coefficients of radionuclides by aquatic plants in the lower reaches of the Southern Bug River and the Bug Estuary were: for ^{90}Sr – $40 \div 1020$, for ^{137}Cs – $60 \div 1680$. The highest accumulation coefficients are characteristic of filamentous algae (*Cladophora fracta*) and pondweed (*Potamogeton perfoliatus*, *Potamogeton natans*): for ^{137}Cs – up to 1680 l/kg, for ^{90}Sr – up to 1020 l/kg. For the Bug Estuary and the Tashlyk Reservoir, whose waters are characterised by higher salinity and mineralisation, the accumulation coefficients of radionuclides by macrophytes are 2 times lower. For filamentous algae (*Cladophora fracta*), pondweed (*Potamogeton perfoliatus*, *Potamogeton natans*), and elodea (*Elodea canadensis*), high (≤ 9) biological absorption coefficients for Pb and Zn were obtained; considerable biological absorption coefficients (≤ 1) were obtained for Cd and Cr. For the water area of the lower reaches of the Southern Bug River and the Bug Estuary, filamentous algae (*Cladophora fracta*), pondweed (*Potamogeton perfoliatus*, *Potamogeton natans*), and elodea (*Elodea canadensis*) can act as bioindicators of water quality and as components of phytoremediation systems for the removal of radioactive substances and heavy metals. **Key words:** water bodies, water from water bodies, aquatic plants, pollution, accumulation factors, biological uptake factors, radionuclides, heavy metals, Southern Bug River, Bug Estuary.

Постановка проблеми. Розвиток регіону, який включає територіальні громади м. Миколаєва та прилеглих територій та територія якого відноситься до посушливої зони, а прісні водні ресурси якого обмежені і залежать, головним чином, від притоку

з інших регіонів, потребує якісних і безпечних місцевих водних ресурсів р. Південного Бугу, р. Інгулу і Бузького лиману. На якість цих водних ресурсів впливають як глобальні кліматичні зміни, які призводять до підвищення температури водного сере-



довища, так і чимале антропогенне навантаження. Водяна рослинність акумулює хімічні та радіонуклідні полютанти водойми й тому визначає екологічну та радіаційну ємність водойми.

Актуальність дослідження. Водяна біота, зокрема водяна рослинність, дуже чутливо реагує на хімічний та радіонуклідний склад водоймищ, в яких вона зростає. Цю її якість часто використовують для індикації рівня забруднення водного середовища хімічними та радіонуклідними полютами [1, 2, 5]. Часто при довгостроковому екологічному моніторингу тієї чи іншої водної системи, при оперативній оцінці екологічної ситуації у водоймі використовують дані вмісту радіоактивних речовин у водоростях і параметри кореляційних співвідношень між концентраціями радіонуклідів у водяних компонентах: у воді, у донних відкладеннях, у рибі та у водоростях [3, 4, 7]. Також інформація про присутність тих чи інших екологічних полютантів у водяній рослинності дає уявлення про рівень забруднення водоймища та про динаміку формування екологічної чи радіаційної ємності водної екосистеми [8, 9, 10].

Багато досліджень присвячено вивченню властивостей вищих водяних рослин щодо утримання полютантів довкілля. Є дослідження, які вказали на сезонні зміни накопичення ^{137}Cs і ^{90}Sr у 10 видах вищих водних рослин у водоймі зони відчуження: виявлено, що під час активного росту рослини більше накопичують цезій, а на пізніх стадіях – стронцій.

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 дослідженнями [4, 8] акумуляційних властивостей щодо утримання радіонуклідів водяними рослинами водойм зони українського Лісостепу виявлено пряму залежність між концентрацією радіонуклідів у донних відкладеннях і рівнем їх накопичення у водяних рослинах. Є сучасні оцінки радіоекологічного стану водних екосистем р. Дніпро після Чорнобильської катастрофи [3, 4] через оцінку біоаккумуляції ^{137}Cs рослинами у заплавлених екосистемах р. Дніпро. Відомі дослідження [6, 9]), які полягли в основу розробленої системи «біоплато» для очищення водойм від ^{137}Cs .

При цьому недостатньо вивченими залишаються питання акумуляційних властивостей для конкретних видів водяної рослинності. Мало досліджень щодо визначення коефіцієнтів акумуляції радіонуклідних полютантів для водойм півдня України. Так, мало досліджень відносно розповсюджених у водоймах регіону нитчастих водоростей (*Cladophora fracta* etc) та інших представників макрофітів цих водойм. Виходячи з цього задача полягає у представленні інформації про акумуляційні властивості основних представників біотичної складової водойм пониззя р. Південний Буг і Бузького лиману.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Стаття присвячена аналізу результатів радіометрії та мас-спектрометрії проб водяної рослинності екосистеми пониззя р. Південний Буг і Бузького лиману.

Методологічне або загальнонаукове значення.

Матеріали і методи дослідження. Використано матеріали радіометрії та мас-спектрометрії проб водяних рослин: нитчасті водорості (*Cladophora fracta*), рдест (*Potamogeton perfoliatus*, *Potamogeton natans*), елодея (*Elodea canadensis*) та різних водоростей, які позначено як зелені (через відповідну зміну кольору води), та які відбиралися у шести точках:

- т.1. – р. Інгулець, смт. Снігурівка,
- т.2. – р. Південний Буг, м. Південноукраїнськ,
- т.3. – Ташликське водосховище,
- т.4. – р. Південний Буг, с. Бузьке
- т.5 – III ставок біоочищення ГФК ПУАЕС,
- т.6. – Бузький лиман, м. Миколаїв.

Підготовка проб включала підсушування у сушільній шафі, після зважування – озолення в муфільній печі при температурі 4000С протягом 30 хвил. та визначення зольності. Вміст ^{90}Sr в пробах визначали радіохімічним методом: оксалатним, екстракційним з подальшою радіометрією. Гамма-спектрометричні вимірювання ^{137}Cs здійснювали за допомогою напівпровідникового детектору ДГДК-125В. Вміст важких металів визначали методом мас-спектрометрії на Element-2.

Методологічне значення полягає у комплексному оцінюванні акумуляційних властивостей водяних рослин, що важливо при оцінюванні екологічної та радіаційної ємності водойм.

Основний матеріал дослідження.

Нитчасті водорості (зокрема *Cladophora spp.*, в т.ч. *Cladophora glomerata* / *Cladophora fracta* та ін.) у нижній течії р. Південний Буг і в Бузькому лимані. *Cladophora spp.* присутні у нижній частині Південного Бугу і в прибережних зонах лиману: вони входять до складу перифітону та епіфітону на каменях, коренях макрофітів і донних субстратах. Це підтверджено кількома дослідженнями та оглядами альгофлори басейну [6, с. 77]. Локальні скупчення нитчастих водоростей зазвичай фіксують у мілководних прибережних ділянках, затоках лиману і в місцях з повільною течією (флорайони заплави, гирлові ділянки), а також поблизу джерел надходження поживних речовин (сільськогосподарський стік, міські/промислові викиди). Для нижніх ділянок Південного Бугу характерні змішані комплекси макрофітів і епіфітних нитчастих водоростей. https://books-nasu.org.ua/prodromus-of-spore-plants-of-ukraine-algae-book-2/?utm_source=chatgpt.com Також широко розповсюдженими є вищі водяні рослини роду рдест (*Potamogeton spp.*) – це один із найпоширеніших і екологічно важливих компонентів прісноводних та слабкосолонуватих водойм

України, зокрема басейну Південного Бугу і Бузького лиману. У басейні Південного Бугу найчастіше фіксуються []: *Potamogeton perfoliatus*, *Potamogeton pectinatus* (syn. *Stuckenia pectinata*), *Potamogeton crispus*, *Potamogeton natans*, які особливо поширені у нижній течії річки, заплавних протоках, прибережних мілководдях зі слабкою течією. У лимані переважають евригалінні та евритрофні види, насамперед: *Potamogeton pectinatus* – найстійкіший до солонуватої води; *P. perfoliatus* – у ділянках із меншою солоністю; *P. crispus* – локально, у прісніших зонах. Рдсти активно накопичують важкі метали (Cu, Zn, Pb, Cd), акумулюють радіонукліди, реагують змінами біомаси та морфології на забруднення. Відносно елодеї (*Elodea canadensis*) відомо, що вона відноситься до інвазійних видів пониззя р. Південний Буг та Бузького лиману. Рослина масово зустрічається у нижній течії Південного Бугу. Вона часто домінує на мілководдях (глибиною до 1 м), утворюючи суцільні підводні зарості. На річці, є затоки та ділянки зі слабкою течією на мулистих або піщано-мулистих ґрунтах. Це сприяє інтенсивному зростанню елодеї, особливо у теплі сезони року.

Аналіз результатів радіоекологічних досліджень у воді та у водяних рослинах екосистем р. Південний Буг, Дніпро та визначених на їх підставі коефіцієнтів акумуляції наведено у таблицях 1,2. Коефіцієнти

акумуляції K_a (л/кг) визначалися, як відношення вмісту радіонукліду у попелу сухої біомаси до вмісту у донному ґрунті:

$$K_a = \frac{C_i}{W_i},$$

де C_i – вміст радіонукліду у попелі водяної рослини, Бк/кг, W_i – вміст радіонукліду у воді, Бк/л.

Аналіз інтенсивності накопичення радіонуклідів у компонентах усіх досліджених водних екосистем показав, що навіть з урахуванням похибки вимірювань (10–15%) значення коефіцієнтів акумуляції для водяної рослинності відрізнялися як між видами, так й залежно від водойми. Коефіцієнти акумуляції радіонуклідів водяними рослинами становили: для ^{90}Sr – $40 \div 1020$, для ^{137}Cs – $60 \div 1680$. При цьому найбільшими коефіцієнти акумуляції спостерігали для нитчастих водоростей (*Cladophora fracta*) та рдста (*Potamogeton perfoliatus*, *Potamogeton natans*): за ^{137}Cs – до 1680 л/кг, за ^{90}Sr – до 1020 л/кг.

Також можна відзначити, що для макрофітів р. Південний Буг коефіцієнти акумуляції як ^{90}Sr , так і ^{137}Cs , виявилися приблизно у 1,5 раза вищими за відповідні показники для р. Дніпро. Це пов'язано, насамперед, із різними фізико-хімічними характеристиками цих водойм. Максимальні значення акумуляції ^{90}Sr та ^{137}Cs водяними рослинами у Південному

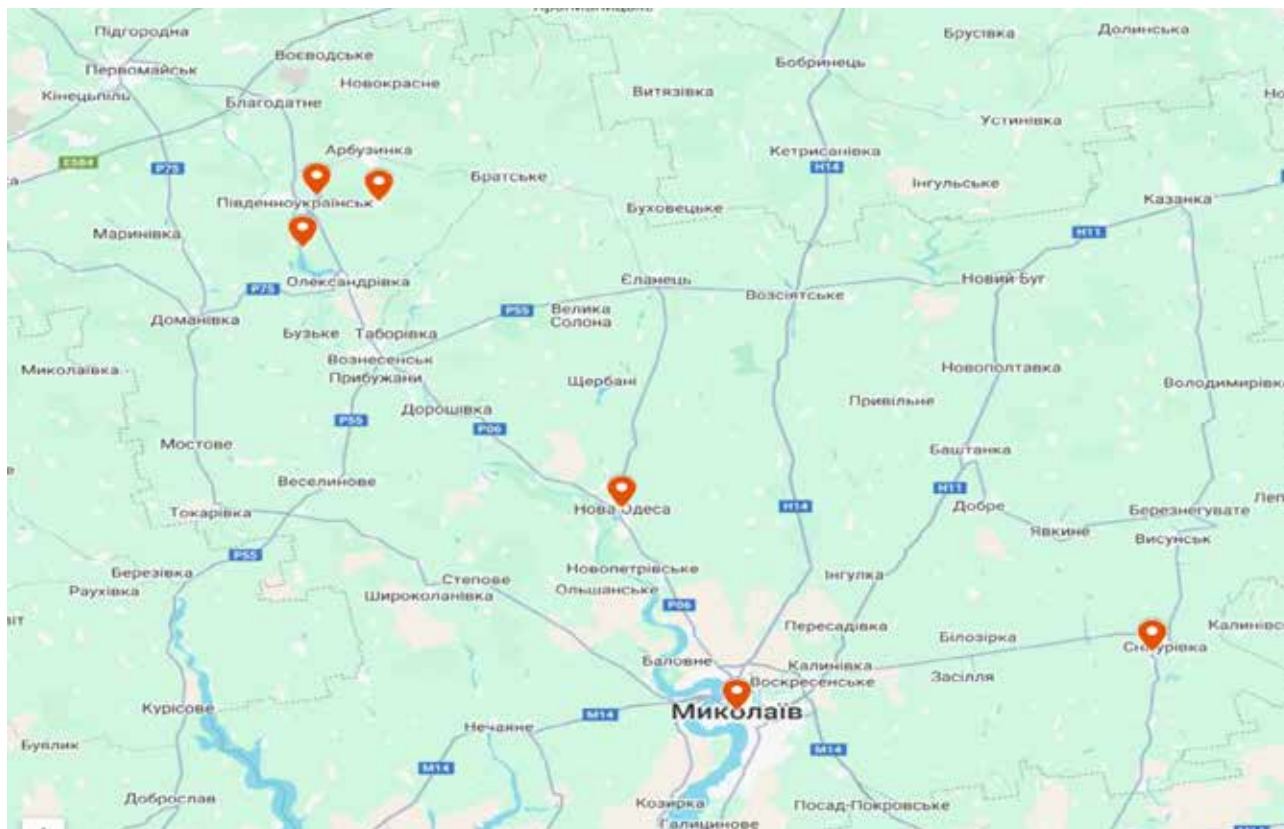


Рис. 1. Карта точок відбору проб донних відкладів і водяних рослин (у 2007 р., 2015 р., 2021 р., 2024 р.) для визначення акумуляційних властивостей

Таблиця 1

Коефіцієнти акумуляції ^{137}Cs водяними рослинами, л/кг

Точки відбору проб	Нитчасті водорості (<i>Cladophora fracta</i>)	"Зелені" водорості	Елодея (<i>Elodea canadensis</i>)	Рдест (<i>Potamogeton perfoliatus</i>)	Рдест (<i>Potamogeton natans</i>)
T.1.	910±10	810±10	258±15	1050±20	980±15
T.2.	1680±80	610±12	320±20	1270±20	1210±20
T.3.	340±15	210±10	80±10	430±10	410±10
T.4.	1520±20	420±15	120±20	1040±10	990±15
T.5.	310±20	190±20	60±10	550±20	580±20
T.6.	920±15	60±10	180±20	920±15	890±15

Таблиця 2

Коефіцієнти акумуляції ^{90}Sr водяними рослинами, л/кг

Точки відбору проб	Нитчасті водорості (<i>Cladophora fracta</i>)	"Зелені" водорості	Елодея (<i>Elodea canadensis</i>)	Рдест (<i>Potamogeton perfoliatus</i>)	Рдест (<i>Potamogeton natans</i>)
T.1.	410±10	62±6	105±20	430±10	480±20
T.2.	980±20	50±5	320±20	1020±20	1030±20
T.3.	340±20	40±5	60±10	630±15	710±20
T.4.	1020±20	48±8	320±10	940±20	920±20
T.5.	810±15	68±8	360±12	970±15	910±15
T.6.	320±20	38±4	180±20	520±15	490±15

Таблиця 3

Коефіцієнти акумуляції ^{137}Cs , ^{90}Sr водяними рослинами р. Південний Буг та Бузького лиману

Вид	^{137}Cs	^{90}Sr
Нитчасті водорості (<i>Cladophora fracta</i>)	990±80	680±50
"Зелені" водорості	330±10	50±10
Елодея (<i>Elodea canadensis</i>)	310±40	320±20
Рдест (<i>Potamogeton perfoliatus</i>)	1005±20	980±30
Рдест (<i>Potamogeton natans</i>)	990±30	960±40

Бузі спостерігалися у верхньому руслі річки: т.2., т.4.): в середньому 1410 ± 30 і 970 ± 30 відповідно для ^{137}Cs і ^{90}Sr . Менші від 2 до 5 різів коефіцієнти акумуляції характерні для точки відбору проб у Бузькому лимані та у Ташликському водосховищі. Це також обумовлено відмінностями у мінеральному складі, де лиманські води та води водосховища, яке виступає ставком-охолоджувач ПУАЕС, характеризуються більшою солоністю та мінералізацією. Узагальнення всіх даних представлено у таблиці 3.

Оцінювання акумуляційної здатності водяних рослин щодо важких металів здійснювалося за коефіцієнтами біологічного поглинання ($K_{\text{бн}}$), який визначали як відношення вмісту елемента у попелу сухої біомаси до вмісту у донному ґрунті:

$$K_{\text{бн}} = \frac{C_i}{S_i},$$

де C_i – вміст елемента у попелі водної рослини, мг/кг, S_i – вміст елемента у донному ґрунті, мг/кг.

Результати визначення коефіцієнтів $K_{\text{бн}}$ різними видами водяних рослин наведено у таблиці 4.

З результатів маємо, що для більшості металів $K_{\text{бн}}$ є більшим за 1. Це свідчить про активне поглинання їх водоростями. Високі коефіцієнти біологічного поглинання свідчать про наявність техногенного забруднення водних компонентів металами. Результати свідчать, що р. Південний Буг у нижній течії та Бузький лиман більш забруднені важкими металами, ніж у верхній течії.

Також можна зробити висновок, що для акваторії пониззя р. Південний Буг та Бузький лиман нитчасті водорості (*Cladophora fracta*), рдест (*Potamogeton perfoliatus*, *Potamogeton natans*), елодея (*Elodea canadensis*) можуть виступати як біоіндикатори якості води та як компоненти фіторе mediaційних систем при очищенні від радіоактивних речовин та важких металів.

Висновки і перспективи подальших досліджень.

1. Коефіцієнти акумуляції радіонуклідів водяними рослинами пониззя р. Південний Буг та

Таблиця 4

Коефіцієнти біологічного поглинання важких металів дослідженими водними рослинами

Вид	Cr	Cd	Zn	Pb
Нитчасті водорості (<i>Cladophora fracta</i>)	1,8	2,2	9,2	14,0
"Зелені" водорості	1,3	1,3	2,0	2,0
Елодея (<i>Elodea canadensis</i>)	1,5	1,8	9,0	12,0
Рдест (<i>Potamogeton perfoliatus</i>)	1,8	2,3	9,4	15,0
Рдест (<i>Potamogeton natans</i>)	2,1	2,2	9,3	14,0

Бузького лиману становили: для ^{90}Sr – $40 \div 1020$, для ^{137}Cs – $60 \div 1680$. Найбільшими коефіцієнти акумуляції характерні для нитчастих водоростей (*Cladophora fracta*) та рдеста (*Potamogeton perfoliatus*, *Potamogeton natans*): за ^{137}Cs – до 1680 л/кг, за ^{90}Sr – до 1020 л/кг.

2. Для Бузького лиману та Ташликського водосховища, води яких відзначаються більшою солоністю та мінералізацією, коефіцієнти акумуляції радіонуклідів макрофітами є від 2-х разів меншими.

3. Для нитчастих водоростей (*Cladophora fracta*), рдеста (*Potamogeton perfoliatus*, *Potamogeton natans*), елодея (*Elodea canadensis*) отримано високі (≤ 9) коефіцієнти біологічного

поглинання Pb, Zn; чималі коефіцієнти біологічного поглинання (≤ 1) для Cd, Cr.

4. Для акваторії пониззя р. Південний Буг та Бузького лиману нитчасті водорості (*Cladophora fracta*), рдест (*Potamogeton perfoliatus*, *Potamogeton natans*), елодея (*Elodea canadensis*) можуть виступати як біоіндикатори якості води та як компоненти фіторе mediaційних систем при очищенні від радіоактивних речовин та важких металів.

Перспективи використання результатів дослідження.

Результати досліджень будуть впроваджені при розробленні ремедіаційних заходів з біоочищення водойм пониззя р. Південний Буг та Бузького лиману.

Література

- Ganzha Ch., Gudkov D., Ganzha D., Klenus V., Nazarov A. Accumulation and distribution of radionuclides in higher aquatic plants during the vegetation period (Lake Glyboke, Chernobyl Exclusion Zone). *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020.
- Long-term radiological assessment of a freshwater ecosystem around a nuclear power plant. *Environmental Science and Pollution Research*. 2024. Vol. 31. P. 29669–29683.
- Lukash O., Tkaczenko H., Szikura A., Karpenko Y., Yakovenko O., Sahach O. Accumulation radiocesium (^{137}Cs) by plants of the Dnipro River's floodplain ecosystems after Chernobyl contamination. *Global Journal of Ecology*. 2024. Vol. 9, № 2. P. 117–121. DOI: 10.17352/gje.000104.
- Sapronova V. O., Hubanova N. L., Matviienko N. M. Accumulation of natural and artificial radionuclides in water and hydrobionts of fishing ponds of Dnipropetrovsk region. *Theoretical and Applied Veterinary Medicine*. 2024. Vol. 12, № 1. P. 25–30. DOI: 10.32819/2024.12004.
- Кватернюк С. М., Мандебура С. В., Латуша Д. Р., Максименко М. П., Михальчук О. В. Запобігання забрудненню р. Південний Буг нітрогенвмісними сполуками з використанням штучно-водно-болотних угідь. *Сучасні технології будівництва*. 2025. Вип. 37, № 2. С. 200–207.
- Мазур І., Наконечний І. Плавнева рослинність степових річок Миколаївської області та її стан у сучасних еколого-гідрологічних умовах середовища. *Наукові записки НУБіП України*. № 2 (84), 2020. С. 76–87.
- Махінько Р. М., Дунаєвська О. Радіонуклідне забруднення річок Полісся: аналіз біоаккумуляції у гідробіонтів. *Balanced Nature Using*. 2025. № 2. DOI: 10.33730/2310-4678.2.2025.337153.
- Скиба В. В. Особливості накопичення радіонуклідів ^{137}Cs і ^{90}Sr вищими водними рослинами в умовах радіоактивно забруднених водойм Лісостепу України. *Агробіологія*. 2023. № 1.
- Трофімов Я. О., Саблій Л. А. Використання вищих водних рослин для очищення стічних вод від іонних домішок. *Чиста вода. Фундаментальні, прикладні та промислові аспекти: матеріали VII Міжнар. наук.-практ. конф. (25–26 листоп. 2021 р., м. Київ)*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. С. 196–197.
- Шевчук А. Екологічний стан зливових стоків міст Причорноморського регіону. *Екологічна безпека*. 2020. № 2 (30). С. 90–97.

Дата першого надходження статті до видання: 30.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

ЕКОЛОГО-ГІГІЄНИЧНА ОЦІНКА СИСТЕМ ВОДОПОСТАЧАННЯ МІСТА МИКОЛАЄВА В МЕЖАХ БАСЕЙНУ РІЧКИ ДНІСТЕР

Петровська М.А., Захарова В.І., Ваньо Н.О.

Львівський національний університет імені Івана Франка

вул. Університетська, 1, 79000, м. Львів

petrovskamyr@gmail.com, viktoryz435@ukr.net, nazar.vano@lnu.edu.ua

У статті оцінено сучасний стан водно-ресурсного потенціалу міста Миколаєва Львівської області, проведено комплексне еколого-гігієнічне оцінювання функціонування систем водопостачання в межах басейну річки Дністер. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю оптимізації управління водними ресурсами регіону та забезпечення населення якісною питною водою відповідно до сучасних санітарно-гігієнічних вимог. Об'єктом аналізу є поверхневі води річок Дністер та Зубра, а також підземні горизонти, що використовують для потреб міста.

З'ясовано гідрогеологічні особливості регіону, де основними джерелами водопостачання є підземні води, приурочені до відкладів четвертинного віку, третинного мезозою і палеозою. Встановлено, що високе залягання ґрунтових вод (0,2–0,5 м) в алювіальних терасах річкових долин сприяє заболоченню територій і підвищує вразливість водоносних горизонтів до антропогенного забруднення. Особливу увагу приділено проблемі мінералізації: глибокі горизонти характеризуються підвищеним вмістом солей, а води четвертинних відкладів мають гідрокарбонатно-кальцієвий тип із високою твердістю. Фактична твердість води в межах міста (2,40–6,40 ммоль/дм³) відповідає українським нормативам, проте в кілька разів перевищує стандарти ЄС (1,5 ммоль/дм³).

Експериментальна частина дослідження базується на результатах лабораторного аналізу та експрес-тестування проб води з приватних колодязів, свердловин та централізованої мережі. Виявлено локальні перевищення ГДК по амонію, нітратах і нітридах, що безпосередньо корелює з інтенсивною господарською діяльністю, нераціональним використанням добрив і відсутністю належної каналізації у приватному секторі.

Соціологічне дослідження показало, що лише 37 % мешканців задоволені якістю води, тоді як понад 28 % опитаних змушені споживати воду з колодязів, які є найбільш епідеміологічно небезпечними. На основі отриманих даних обґрунтовано необхідність впровадження систем пом'якшення води на водозаборах, створення водоохоронних зон вздовж малих річок і впровадження басейнового принципу управління для запобігання подальшій деградації водних екосистем регіону. *Ключові слова:* водопостачання, питна вода, твердість води, нітратне забруднення, норма, стандарт, ГДК.

Environmental and hygienic assessment of the water supply systems of the city of Mykolaiv within the Dniester river basin.
Petrovska M., Zakharova V., Vanyo N.

This article assesses the current state of water resource potential in the city of Mykolaiv, Lviv Oblast, and provides a comprehensive environmental and hygienic evaluation of the functioning of water supply systems within the Dniester River basin. The relevance of the study is determined by the need to optimise water resource management in the region and to ensure the provision of high-quality drinking water in accordance with modern sanitary and hygienic standards. The study focuses on surface waters of the Dniester and Zubra rivers, as well as groundwater aquifers used for municipal supply.

The hydrogeological characteristics of the region have been analysed, showing that the main sources of water supply are groundwater associated with Quaternary, Tertiary, Mesozoic and Palaeozoic deposits. It has been established that a high groundwater table (0,2–0,5 m) within alluvial river terraces contributes to waterlogging and increases the vulnerability of aquifers to anthropogenic contamination. Particular attention is paid to mineralisation: deeper aquifers are characterised by elevated salinity, whereas waters of Quaternary deposits are predominantly of the hydrocarbonate-calcium type with increased hardness. The measured water hardness within the city (2,40–6,40 mmol/dm³) complies with Ukrainian standards but significantly exceeds EU recommended levels (1,5 mmol/dm³).

The experimental component is based on laboratory analysis and rapid testing of water samples from private wells, boreholes and the centralised water supply system. Local exceedances of maximum permissible concentrations (MPCs) for ammonium, nitrates and nitrites have been identified, which correlate with intensive agricultural activity, improper fertiliser use and the lack of adequate sewerage infrastructure in the private sector.

The sociological survey revealed that only 37 % of residents are satisfied with water quality, while more than 28 % rely on well water, which poses the highest epidemiological risk. Based on the obtained results, the necessity of implementing water softening technologies at water intake facilities, establishing protection zones along small rivers, and introducing a river basin management approach is substantiated in order to prevent further degradation of aquatic ecosystems. *Key words:* water supply, drinking water, water hardness, nitrate pollution, standards, maximum permissible concentration.

Постановка проблеми. Забезпечення населення якісною питною водою є стратегічним завданням екологічної безпеки України, що особливо актуально для регіонів із високим антропогенним наван-

таженням. Місто Миколаїв Львівської області, розташоване в межах транскордонного басейну річки Дністер, стикається з комплексом взаємопов'язаних гідрогеологічних проблем, зумовлених як природ-



ними геохімічними особливостями, так і застарілою інфраструктурою житлово-комунального господарства. Серед них невідповідність якості підземних вод вимогам Директив ЄС щодо її твердості, яка спричиняє побутові незручності для мешканців (накип, знос техніки) та потребує впровадження сучасних методів пом'якшення. Незадовільний стан каналізаційних мереж та неконтрольоване використання азотних добрив у приватному секторі сприяє інфільтрації сполук азоту (нітратів та нітритів) у колодязні води, створюючи гігієнічну загрозу, особливо для вразливих верств населення, які використовують децентралізовані джерела.

Актуальність дослідження. Існуюча система моніторингу та управління водними ресурсами об'єкта дослідження не враховує повною мірою басейновий принцип і динаміку техногенного впливу. Інтенсивне господарювання сприяло комплексному еколого-гігієнічному оцінюванню систем водопостачання міста Миколаєва в межах басейну річки Дністер для розробки науково обґрунтованих рекомендацій щодо модернізації водної інфраструктури та захисту довкілля регіону.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Виконане дослідження є частиною науково-дослідної роботи кафедри конструктивної географії і картографії на тему: «Проблеми трансформації природно-антропогенних геосистем західного регіону України в контексті Євроінтеграції», номер держреєстрації 0123U102092.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз наукових публікацій засвідчує, що організаційно-технологічні питання водопостачання вивчено у працях Г. Дрозда, В. Кравченка, Б. Охримюка, В. Сліпченка; організаційно-економічним механізмам підприємств водопостачання присвячено праці І. Абрамовича, А. Ачкасова, Л. Кравцової, І. Корінька, А. Крушевського, Т. Момот, Г. Онищука, М. Руля, В. Петросова, Т. Юр'євої; питанням державного регулювання та реформування водопостачання як підрозділу житлово-комунального господарства – праці В. Бабаєва, А. Качура, С. Корнійчука, О. Кучеренко, М. Руля, Г. Семчука, Ю. Хіврича; проблемам водопостачання населення з централізованих систем – праці В. Кравченко, В. Хільчевського, В. Осадчого, А. Яцика, В. Пелешенко, М. Мальованого та ін. Здебільшого, дослідження присвячено проблемам водопостачання, стосуються виробничих аспектів. Значно менше висвітлено питання водопостачання на регіональному рівні, що є актуальним предметом нашого дослідження. Серед зарубіжних вчених, санітарно-гігієнічні ризики водоспоживання, проблеми нітратного забруднення та імплементацію європейських стандартів якості води активно досліджують такі науковці, як М. Уорд (M. Ward) [14], П. Сенгупта (P. Sengupta) [12] та Н. Вульвуліс (N. Voulvoulis) та ін. [13].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Незважаючи на те, що питання загальної твердості води в регіоні піднімалося неодноразово, євроінтеграційний курс України спонукає до адаптації систем водопідготовки під жорсткіші норми ЄС. У статті наголошено, що показник $6,40 \text{ ммоль/дм}^3$, який є допустимим в Україні, є критично високим для європейської практики і потребує нових підходів до децентралізованого та централізованого пом'якшення води. Невирішеними залишаються ризики для мешканців, які використовують шахтні колодязі в умовах відсутності сучасних каналізаційних мереж у приватному секторі. Поза межами досліджень залишилася проблема суб'єктивного оцінювання якості води мешканцями міста та їхня готовність до використання альтернативних джерел (бутильована вода, фільтрація).

Новизна полягає у системному підході до оцінки якості питної води через призму євроінтеграційних вимог та локальних антропогенних викликів. Завдяки використанню методів експрес-тестування та лабораторного аналізу в конкретних точках відбору встановлено чітку кореляцію між типом землекористування (приватне господарство, інтенсивне внесення добрив) та рівнем забруднення водоносних горизонтів нітратами й амонієм. Виявлено зони ризику, де концентрація нітритів перевищує ГДК, що дозволяє диференціювати заходи безпеки для різних мікрорайонів міста.

Методологічне або загальнонаукове значення. У процесі дослідження проаналізували існуючі наукові джерела [6, 7] і законодавчо-нормативну базу України [3, 8–10]. Використали комплексний підхід, що включає лабораторний аналіз проб води, метод експрес-тестування на вміст нітратів та нітритів, а також соціологічне опитування мешканців для оцінки рівня задоволеності якістю водопостачання. Проаналізували хімічний склад питної води з різних джерел і з'ясували ступінь її безпечності для споживача. При формулюванні висновків дослідження використали логічні узагальнення.

Викладення основного матеріалу. Води Миколаєва представлені річкою Дністер (2–3 км від центру міста) та її притокою Зубра, а також іншими малими водотоками, що належать до басейну Чорного моря. Джерелами водопостачання м. Миколаєва є підземні води, приурочені до відкладів четвертинного віку, третинного мезозою і палеозою. Водонесні горизонти мезозою і палеозою залягають глибоко і мають підвищену мінералізацію. Води четвертинних відкладів поширені в обмеженій кількості, вони здебільшого прісні і за хімічним складом гідрокарбонатно-кальцієвого типу. Водонесним шаром є алювій терас річкових долин. Високе залягання (в межах 0,5–0,2 м) ґрунтових вод часто сприяє заболоченню [4].

Водопостачання Миколаєва здійснюють шахтними колодзями і свердловинами. Централізовано подають воду зі Стрийського водогону, розташованого за 100 км від обласного центру. Вода зі свердловини

глибиною 22–33 м спершу надходить через колектор до водозабору, де змішується з водою з інших свердловин і далі потрапляє до насосів, що перенаправляють її під тиском 7,3 атмосфер до села Заклад і вже звідти насосами перекачують у Миколаїв. Також є робоча свердловина № 4 в с. Липівка Стрийського району Львівської обл., басейн річки Зубра.

Для Львівщини характерною є підвищена твердість води (вміст солей кальцію і магнію), що призводить до утворення накипу в побутових приладах і котлах. Відповідно до показників якості води в м. Миколаєві, наведених у табл. 1, вода є м'якою ($2,40 \text{ ммоль/дм}^3$) або середньої твердості ($6,40 \text{ ммоль/дм}^3$) згідно українського нормування, але перевищує норми ЄС. Це призводить до інтенсивного утворення накипу та передчасного зносу побутової техніки, про що зазначають 90 % опитаних мешканців.

По вул. Бандери простежено перевищення ГДК за амонієм. У місці відбору проб розташовані приватні будинки, поруч з якими активно ведуть господарство (здебільшого садять картоплю) і, зростання концентрації зумовлене надходженням у ґрунтові води господарсько-побутових стічних вод, азотних і органічних добрив. Іноді, особливо в глибоких підземних водах, можлива присутність аміаку, що утворився за рахунок відновлення нітратів при відсутності кисню [1]. Показники рН і загальна мінералізація в межах норми.

Соціологічне опитування показало критично низький рівень задоволеності якістю питної води: лише 37,1 % мешканців оцінюють її позитивно, 40,9 – задоволені частково і 22,0 % – не задоволені. Це змушує населення шукати альтернативні способи забезпечення питних потреб: понад 17 % вико-

ристовують бутильовану воду, а 12 % встановлюють додаткові побутові фільтри, що вказує на недостатню ефективність муніципальної системи водопідготовки [2]. Виходячи з того, що більшість респондентів п'є воду з колодязя (28,8 %), важливо було з'ясувати вміст нітратів і нітритів у цій воді за допомогою експрес-смужок (рис. 1). Гранично допустима концентрація нітратів у питній воді – 50 мг/дм^3 , а нітритів – $0,5 \text{ мг/дм}^3$ [11].

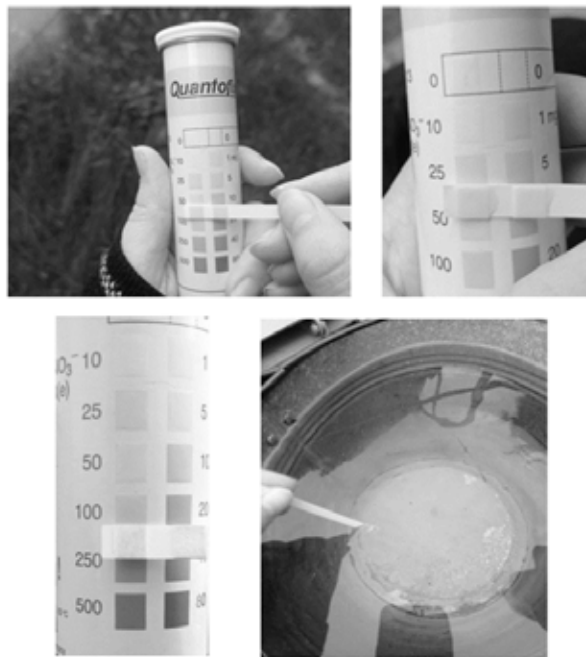


Рис. 1. Результати експрес-тесту на нітрати та нітрیتی води з колодязя

Таблиця 1

Показники якості води м. Миколаїв

Місце відбору проб	Показник	Одиниці виміру	Фактичні дані	Норми України	Норми ЄС	Тип водопостачання
вул. Вузька	Нітрати	мг/дм^3	10	$\leq 45,0$	$\leq 25,0$	Колодязь
	Амоній	мг/дм^3	0,08	$\leq 0,5$	$\leq 0,5$	
	Загальна мінералізація	мг/дм^3	462	$\leq 1\,000,0$	$\leq 1\,000,0$	
	Залізо	мг/дм^3	0,10	$\leq 0,3$	$\leq 0,1$	
	рН	—	7	6,5–8,5	6,5–8,5	
	Твердість	ммоль/дм^3	6,40	$\leq 7,0$	$\leq 1,5$	
вул. Бандери	Амоній	мг/дм^3	2	$\leq 0,5$	$\leq 0,5$	Свердловина
	Загальна мінералізація	мг/дм^3	398	$\leq 1\,000,0$	$\leq 1\,000,0$	
	рН	—	7,60	6,5–8,5	6,5–8,5	
	Твердість	ммоль/дм^3	2,40	$\leq 7,0$	$\leq 1,5$	
вул. Болоня	Нітрати	мг/дм^3	3	$\leq 45,0$	$\leq 25,0$	Центральний водогін
	Загальна мінералізація	мг/дм^3	188	$\leq 1\,000,0$	$\leq 1\,000,0$	
	рН	—	8,06	6,5–8,5	6,5–8,5	
	Твердість	ммоль/дм^3	4,50	$\leq 7,0$	$\leq 1,5$	

У різних частинах Миколаєва відбирались проби води з колодязів та свердловин (рис. 2, табл. 2).

Дослідження колодязної води в різних районах міста виявило локальні перевищення ГДК по нітратах та нітритах (зокрема, по вул. Тарла вміст нітратів сягає 100 мг/дм³ при нормі 50 мг/дм³). Основними чинниками погіршення якості води в приватних джерелах є відсутність герметичних систем водовідведення у приватному секторі та нераціональне використання азотних добрив на присадибних ділянках.

Також ми проаналізували якісний склад води, відібраної з двох колодязів на околицях міста та водопровідну воду в навчально-науковій лабораторії аналізу ґрунтів і природних вод географічного факультету ЛНУ імені Івана Франка. Результати аналізу відображено в табл. 3.

Головні висновки. Наявна схема централізованого водопостачання зі Стрийського водогону та локальних свердловин не передбачає стадії демінералізації або пом'якшення. Для досягнення європейських стандартів якості та зниження економічних

збитків населення необхідна модернізація водопровідних станцій із впровадженням методів іонообмінного або мембранного очищення. Проникнення господарсько-побутових стоків у водоносні пласти потребує негайного облаштування жорстких зон санітарної охорони навколо джерел водозабору, заборони використання азотних добрив та регламентації будівництва септиків у радіусі впливу водозабірних споруд.

Перспективи використання результатів дослідження. Методика експрес-тестування колодязної води на вміст нітратів та нітритів може бути впроваджена місцевими органами самоврядування для створення інтерактивної карти якості води приватного сектору, що дозволить оперативно інформувати мешканців про зони ризику та запобігати випадкам отруєння. Результати соціологічного опитування та лабораторні дані можуть слугувати основою для проведення інформаційних кампаній серед населення щодо раціонального використання добрив і вибору побутових фільтрів, адаптованих саме під специфічний хімічний склад води міста Миколаєва.



Рис. 2. Точки відбору проб води [5]

Таблиця 2

Результати проб води в м. Миколаїв

Місце відбору проб	Нітрати	Нітрити
вул. Калнишевського	50	1
вул. Шевченка	50	1
вул. Бузька	25	5
вул. Болоня	10	1
вул. Кравченко	10	0
вул. Лісова	25	1
вул. Тарла	100	5
вул. Франка	25	0

Таблиця 3

Якісний склад води в м. Миколаїв

Показник	Водопровідна, центр міста	Колодязь (1), околиці міста В	Колодязь (2), околиці міста К	ГДК
Водневий показник, рН	6,9	6,4	6,6	6,5–8,5
SO ₄ , мг/дм ³	< 5, слабка муть	< 10, слабка муть	не помутніло	Водопровідна ≤ 250–500; колодязь ≤ 500
Cl ⁻ , мг/дм ³	< 10, слабка муть	< 10, слабка муть	< 10, слабка муть	Водопровідна ≤ 250–350; колодязь ≤ 350
NO ₂ , мг/дм ³	ледь помітно	блідорозовий	ледь помітно	Водопровідна і колодязь ≤ 50,0
NO ₃ , мг/дм ³	ледь помітно	малиново-рожевий	блідорозовий	Водопровідна ≤ 0,5; колодязь ≤ 3,3
Ca, мг/дм ³	слабка, в межах норми	значний вміст	значний вміст	Не визначено
Fe (загальне), мг/дм ³	0,2	0,5	0,3	Водопровідна ≤ 0,2; колодязь ≤ 1,0
NH ₄ , мг/дм ³	0	0,5	0,7	Водопровідна ≤ 0,5; колодязь ≤ 2,6
Кількісний аналіз на хлор, мг/л	14,74	14,74	9,38	Водопровідна ≤ 250–350; колодязь ≤ 350

Література

1. Аміак в питній воді. URL: <https://ezupilska-gromada.gov.ua/news/1653393182/> (дата звернення: 20.03.2026).
2. Анкетування. URL: <https://forms.gle/rkntegLdgeJjRHGbA> (дата звернення: 20.03.2026).
3. ДСТУ 7525:2014. Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості. Київ, 2014. URL: http://icwc.org.ua/docs/dstu_7525_2014.pdf (дата звернення: 20.03.2026).
4. Івашків Я. М., Івашків К. В., Кушнір Є. І. Миколаївське Придністров'я : посібник. Львів : Основа, 1993. 165 с.
5. Карти Миколаєва. OpenStreetMap. URL: <https://www.openstreetmap.org/#map=16/49.5238/23.9813&layers=N> (дата звернення: 20.03.2026).
6. Петровська М. А. Нормування якості довкілля : навч. посібн. Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2017. 300 с.
7. Петровська М. А. Стандартизація, метрологія і сертифікація довкілля : навч. посібн. Львів : Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2010. 420 с.
8. Про затвердження Державних санітарних норм та правил «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» : ДСанПіН 2.2.4-171-10. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text> (дата звернення: 20.03.2026).
9. Про питну воду та питне водопостачання : Закон України від 10.01.2002 № 2918-III. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2918-14#Text> (дата звернення: 20.03.2026).
10. Про правовий режим зон санітарної охорони водних об'єктів : постанова Кабінету Міністрів України від 18.12.1998 № 2024. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2024-98-%D0%BF#Text> (дата звернення: 20.03.2026).
11. Стан питної води в Україні. URL: <https://labprice.ua/statti/stan-pitnoyi-vodi-v-ukrayini/> (дата звернення: 20.03.2026).
12. Sengupta P. Potential health impacts of hard water : International Journal of Preventive Medicine. 2013. Vol. 4, No. 8. P. 866–875.
13. Voulvoulis N., Arpon K. D., Giakoumis T. The EU Water Framework Directive: From great expectations to problems with implementation : Science of the Total Environment. 2017. Vol. 575. P. 358–366. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.09.228.
14. Ward M. H. et al. Drinking water nitrate and human health: An updated review : International Journal of Environmental Research and Public Health. 2018. Vol. 15, No. 7. 1557. DOI: 10.3390/ijerph15071557.

Дата першого надходження статті до видання: 25.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ЯКОСТІ ПІДЗЕМНИХ ВОД КП «ВОДГЕО» М. СМІЛА ТА ПЕРСПЕКТИВНІ ШЛЯХИ УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЇХ ОЧИЩЕННЯ

Хоменко О.М.¹, Жицька Л.І.¹, Папач В.В.², Частокіленко І.П.³

¹Черкаський державний технологічний університет

бульв. Шевченка, 460, 18006, м. Черкаси

²Державна установа «Черкаський обласний Центр контролю та профілактики хвороб

Міністерства охорони здоров'я України»

вул. Захисників України, 3, 18005, м. Черкаси

³Національний університет цивільного захисту України

вул. Онопрієнка, 8, 18034, м. Черкаси

o.khomenko@chdtu.edu.ua

У роботі проведено екологічну оцінку якості питних підземних вод Смілянського родовища із використанням затверджених методик та визначено їх відповідність вимогам Державних санітарних норм та правил «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною». Встановлено відхилення від нормативних значень за органолептичними показниками, а також підвищений вміст загального заліза, що знаходиться на межі нормативного значення, що складає 0,2 мг/дм³ та зростає під час постачання води споживачеві. Розглянуто проблему наявності хлорорганічних сполук у воді в результаті її хлорування, зокрема трихлорметану, хлорфенолів, хлороцтових кислот, хлорацетонітрилу, хлораміну та хлорпікрину, та охарактеризовано їх негативний вплив на здоров'я людини. Проаналізовано діючу технологію очищення води на підприємстві «КП ВОДГЕО» м. Сміла Черкаської області, а також сучасні альтернативні методи водопідготовки та водоочищення. Обґрунтовано доцільність застосування на підприємстві методу озонування питної води з метою її знезараження як високо-ефективної та екологічно безпечної технології. Проаналізовано переваги озонування питної води в порівнянні з хлоруванням, що визначаються величиною окислювально-відновлювального потенціалу, який характеризує бактерицидну ефективність. Розроблено принципову схему очищення води методом озонування з використанням озонаторної установки. Наведено показники якості води при впровадженні технології первинного озонування та доведено її ефективність за техніко-експлуатаційними показниками. Встановлено, що в процесі озонування питної води ефективність очищення значно зростає за всіма досліджуваними показниками від 4 до 90,3%, зокрема вміст загального заліза знижується більше ніж на 90%, що важливо для здоров'я людини. *Ключові слова:* оцінка якості підземних вод, нормативні показники, озонування, ефективність технології очищення, техніко-експлуатаційні показники.

Ecological assessment of the quality of groundwater of the municipal enterprise «VODGEO» of the city of Smila and promising ways to improve the technology of their purification. Khomenko O., Zhytska L., Papach V., Chastokolenko I.

This study conducted an environmental assessment of the quality of drinking groundwater from the Smila deposit using approved methodologies and determined its compliance with the requirements of the State Sanitary Standards and Regulations «Hygienic Requirements for Drinking Water Intended for Human Consumption». Deviations from the standard values for organoleptic parameters have been detected, as well as an elevated total iron content, which is at the upper limit of the standard value of 0.2 mg/dm³ and increases during the supply of water to the consumer. This paper examines the issue of the presence of organochlorine compounds in water as a result of chlorination, specifically trichloromethane, chlorophenols, chloroacetic acids, chloroacetonitrile, chloramine and chloropicrin, and describes their adverse effects on human health. This study analyses the current water treatment technology in use at the «KP VODGEO» enterprise in Smila, Cherkasy region, as well as modern alternative methods of water treatment and purification. The report demonstrates the merits of using the ozone treatment method for drinking water at the enterprise for disinfection purposes, as a highly effective and environmentally safe technology. The advantages of ozonation of drinking water compared with chlorination have been analysed, as determined by the oxidation-reduction potential, which characterises bactericidal efficacy. A conceptual scheme of water treatment by ozonation using an ozonation unit has been developed. Water quality parameters following the implementation of primary ozonation technology are presented, and its effectiveness is demonstrated on the basis of technical and operational indicators. It has been established that, during the ozonation of drinking water, the purification efficiency increases significantly across all parameters studied, ranging from 4% to 90.3%; in particular, the total iron content is reduced by more than 90%, which is important for human health. *Key words:* groundwater quality assessment, regulatory indicators, ozonation, efficiency of purification technology, technical and operational indicators.

Постановка проблеми. За останні 100 років загальне використання прісних вод підвищилось на 3115 км³ – у 4,5 рази і, у разі зростання кількості населення до 2050 року, його прогнозовані об'єми вже можуть становити 5500 км³, а екологічна стійкість водних ресурсів планети досягне своєї критич-



ної межі [1, 2]. Тому застосування високоефективних технологій водопідготовки та систем очищення прісної води є важливим етапом раціонального водокористування для забезпечення сталого розвитку. Водоспоживання з підземних джерел на сьогодні становить 20% від загального обсягу [3]. Передумовою такого зростання є інтенсифікація процесів забруднення й виснаження значної частини поверхневих водних об'єктів, а також проблеми з недостатньою кількістю питної води необхідної якості. За прогнозами Інституту водних проблем і меліорації, через 30 років Україні доведеться імпортувати питну воду через підвищене забруднення поверхневих та підземних джерел [4]. Стрімке зростання попиту на прісні підземні води, які в деяких регіонах є одним із основних джерел питної води, обумовлюється ще й хибним твердженням про їх чистоту і високу екологічну якість. Реальна ж картина щодо їх якісних показників характеризується різною мірою напруженості. Разом з цим, ст. 61 Водного кодексу України та Правила охорони підземних вод (п. 2, розд. 3), обумовлюють використання підземних вод питної якості, у першу чергу, для задоволення потреб питного, господарсько-побутового водокористування населенням, а також для харчової промисловості і тваринництва [5, 6]. Державні санітарні норми та правила (ДСанПіН 2.2.4-171-10) передбачають надання переваги водам підземних джерел у забезпеченні потреб громадян, оскільки вони захищені від біологічного, хімічного та радіаційного забруднення (п. 3.1 розд. 3), відповідають медико-санітарним вимогам, критеріям безпечності для здоров'я і життя людини, водних об'єктів та питної води [7-9].

Зважаючи на те, що ресурси підземних вод в Україні є обмеженими, а використання централізованого водопостачання міст із підземних джерел іноді є єдиним практичним рішенням, то виникає необхідність проведення екологічної оцінки технологій водопідготовки та умов водопостачання, адже якісні характеристики питних підземних вод у природному стані або після спеціальної обробки повинні відповідати вимогам, встановленим у відповідності до національних стандартів, нормативів екологічної безпеки водокористування, а також затвердженим санітарним нормам.

Актуальність дослідження. Вода є одним із ключових складових людського буття. Її якість важлива і релевантна для здоров'я людини. Однак, розвиток промисловості, інтенсифікація сільського господарства та пов'язане з цим широке застосування різноманітних добрив, стимуляторів росту, пестицидів і отрутохімікатів, а також військові дії, прямо та опосередковано є тими факторами, що впливають на якість води. Важливим фактором, який визначає якість підземних вод є також природний фактор їх формування. Для забезпечення здоров'я людей вкрай важливо дотримуватись норм оптимального мінерального складу питних вод, який забезпечує не

тільки відповідні смакові якості, а й отримання деяких необхідних організму макро- і мікроелементів, а також токсикологічної нешкідливості, епідеміологічної безпечності, фізико-органолептичних та фізико-хімічних показників безпеки. Тому використання сучасних високоефективних технологічних процесів водопідготовки, що гарантують дотримання санітарно-гігієнічних норм, наукові підходи щодо оцінки та аналізу діючих технологій завжди є актуальними.

Мета роботи. Метою роботи є оцінювання ефективності технології очищення підземних питних вод за ступенем їх безпечності на діючому комунальному підприємстві «КП «ВодГео»» м. Сміла та розробка можливих шляхів підвищення їх якісних санітарно-гігієнічних показників.

Новизна. Проаналізовано фактори, які впливають на показники якості питної води з підземного Смілянського родовища на різних етапах водопідготовки та водокористування з експлуатацією п'яти свердловин. Доведено ефективність використання технології озонування питної води на етапі водопідготовки. Запропоновано схему технологічного процесу та розроблено відповідні рекомендації.

Методи дослідження. У даній роботі використувались загальнонаукові методи: емпіричні (експеримент, спостереження, а також порівняльно-аналітичні лабораторні методи дослідження нормованих показників питної води, на основі ДСТУ 7525:2014. «Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості»), статистичні та системні методи, як одні з найважливіших методів наукових досліджень в екології. Акцентувалась увага на необхідності дотримання відповідної чистоти питної води, гарантування умов екологічної безпеки для здоров'я населення.

Результати досліджень. Статтею 7 Закону України «Про питну воду та питне водопостачання» та статтею 18 Закону України «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення» обумовлюється гарантування державою забезпечення кожної людини питною водою нормативної якості відповідно до науково-обґрунтованих норм питного водопостачання, зважаючи на райони та умови проживання [10, 11]. Вода з підземних джерел питного водопостачання у багатьох випадках не відповідає I класу якості і тому потребує кондиціювання. Це, насамперед, стосується даних мінерального складу, підвищені рівні якого дуже часто мають природне походження. Некондиційні показники в артезіанських водопроводах мають стабільний характер і в динаміці майже не змінюються [12]. Науковці також зазначають, що у разі експлуатації застарілих очисних технологій, що на сьогодні продовжують застосовуватись, деякі гідрохімічні показники питної води можуть не відповідати гігієнічним вимогам. Небезпечними є хімічні речовини з токсикологічними ознаками шкідливості, а саме: галогенорганічні сполуки (тригалометани, галогеноцтові кислоти тощо), які можуть утворитися внас-

лідок використання хлору та його похідних на водопровідних станціях у технології підготовки питної води [13]. В цілому ряді публікацій зазначено, що 25 регіонів держави отримують питну воду з місцевих джерел, що має певні відхилення від нормативних значень (підвищені показники загальної твердості, вмісту хлоридів, сухого залишку, сульфатів, сполук заліза, нітратів, аміаку, мангану), тому значна кількість населення частково або ж повністю споживає привізну питну воду. Останнім часом погіршення якості питних вод у мережах водопостачання й водовідведення значною мірою обумовлене зростаючим впливом процесів корозії та підтоплення, що за умов погодинної водоподачі призводить до гідравлічних перетоків забруднень у трубопроводні системи та формування санітарно-гігієнічного ризику для населення [14, 15]. Військові дії, часті пожежі та вибухи створюють високу ймовірність забруднення підземних водоносних горизонтів унаслідок інфільтрації води з поверхонь вулиць і дворів, просочення крізь нещільності конструкцій дренажних каналів і каналізаційних систем, проходження атмосферних опадів крізь звалища твердого сміття та забруднені горизонти ґрунту [16].

В процесі проведених досліджень нами виявлено, що природні води водоносного горизонту Смілянського родовища, які використовує КП «ВодГео», характеризуються гідрокарбонатно-кальцієвим ($\text{HCO}_3^- \text{Ca}^{2+}$) або магнієвим типом (Mg^{2+}) за гідрохімічним складом. Значення мінералізації води Смілянського родовища становить від 0,3 до 2,0 г/л. Водневий показник (рН) води складає від 6,8 до 7,6, що відповідає слабко-кислому та слабко-лужному середовищу. Загальна твердість вод Смілянського родовища складає від 6 до 9 мг-екв/л, що характеризується як дуже тверда вода. До того ж Черкаська область має поклади залізо-марган-

цевих руд, і основні родовища зосереджені в центральній та південній її частині, зокрема, в межах Черкаського району, до якого відноситься територія нашого дослідження, і через що залізо та марганець можуть знаходитись у питній воді. З огляду на вище зазначені факти питні води із родовища обов'язково повинні проходити доочищення та знезараження, оскільки постачаються мешканцям великого населеного пункту.

Встановлено, що ділянка Смілянського родовища, за рахунок якого на сьогодні функціонує система водопостачання м. Сміла, знаходиться на землях Білозірської селищної ради у південно-східній частині Черкаського району. Спрощену схему циклу видобутку підземних вод та їх водопостачання наведено на рисунку 1.

До основних видів діяльності КП «ВодГео» відноситься: підйом, розподіл, очищення води, забір, перекачування та очищення стічних вод. Основними напрямками КП «ВодГео» щодо водовідведення є прийняття стічних вод та їх транспортування, очищення та знезараження стічних вод.

До системи водопостачання міста входить комплекс інженерних споруд, що використовується для вилучення води з природних джерел, комплекс заходів і методів із метою приведення якості питної води до встановлених нормативних показників, а також транспортування і постачання води споживачам [17].

Водопідготовка включає надходження води на камери переключення 1 та 3 від артезіанських свердловин (насосна станція I-го підйому) та подальшу подачу води на станцію знезалізнення (насосна станція II-го підйому) із метою її подальшого очищення. В технологічну схему очищення води включено 8 швидких одношарових фільтрів (6 фільтрів є робочими та 2 фільтри для перспективного використання), що корегують як хімічні, так і фізичні



Рис. 1. Спрощена схема системи водопостачання міста Сміла

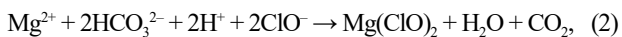
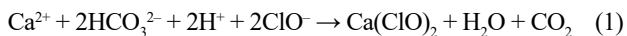
показники якості води.

Технологічна схема водопідготовки підземних вод наведена на рисунку 2.

З метою підвищення ефективності роботи робочих фільтрів для очищення води на підприємстві проводять регенерацію фільтрів, що характеризується повітряно-водяною промивкою фільтрів та використанням фільтроциклу.

Підприємство «ВодГео» з метою знезараження питної води використовує рідкий хлор (Cl_2), що міститься у балонах, а також гіпохлорит натрію (NaClO) марки «Б» та гіпохлорит натрію (NaClO).

Оскільки у воді виявлено наявність солей загальної твердості, а саме гідрокарбонатів кальцію ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) та магнію ($\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$), то відбувається їх хімічна взаємодія з хлорнуватою кислотою (HClO), яку можна описати наступними рівняннями хімічних реакцій:



де карбонатна кислота (H_2CO_3) є нестійкою хімічною сполукою, тому відразу піддається розкладу до вуглекислого газу (CO_2) та води (H_2O).

Іншим реагентом, що використовується підприємством з метою знезараження води, є гіпохлорит натрію (NaClO), у процесі розчинення якого проходить процес дисоціації, що призводить до утворення гіпохлорит-іону, хлорнуватої кислоти HClO та гідроксиду натрію NaOH :



Слід відзначити, що метод хлорування води характеризується рядом недоліків, зокрема знезара-

ження питної води хлором потребує матеріальних витрат на придбання необхідних хімічних реагентів. Проте більш вагомим недоліком, що призводить до негативних наслідків для здоров'я населення, є утворення хлорорганічних сполук (ХОС) у процесі хлорування. До таких ХОС відносять: трихлорметан (ТХМ), хлорфенол, хлороцтові кислоти, хлорацетонітрил, хлорамін і хлорпікрин [18]. Головною небезпекою вмісту ХОС у питній воді є надходження до організму людини із питною водою канцерогенних сполук, що можуть викликати онкологічні захворювання та відповідно зменшувати тривалість життя населення [19].

Досліджені нами показники якості питної води після очищення згідно ДСанПіН 2.2.4-171-10 наведено у таблиці 1.

На основі аналізу даних, що наведено в таблиці 1, можна зробити висновок, що якість питної води в період дослідження за всіма показниками відповідає основним вимогам Державних санітарних правил і норм (ДСанПіН) 2.2.4-171-10 [7], хоча слід звернути увагу на концентрацію заліза загального, яка знаходиться на межі нормативного значення, що складає $0,2 \text{ мг/дм}^3$ та зростає під час доставки води споживачеві. Даний вміст заліза загального можна обґрунтувати загальним станом водопровідних мереж міста Сміла та їх моральною застарілістю, а також низькою насиченістю вод киснем, який витрачається на окиснення сполук заліза, що в кінцевому рахунку впливає на смакові якості води.

З метою знезараження питної води КП «ВодГео» використовує метод хлорування рідким хлором та гіпохлоритом натрію, в результаті чого утворюються хлорорганічні сполуки, що становлять небезпеку для здоров'я людини. Одним із шляхів вирішення даної

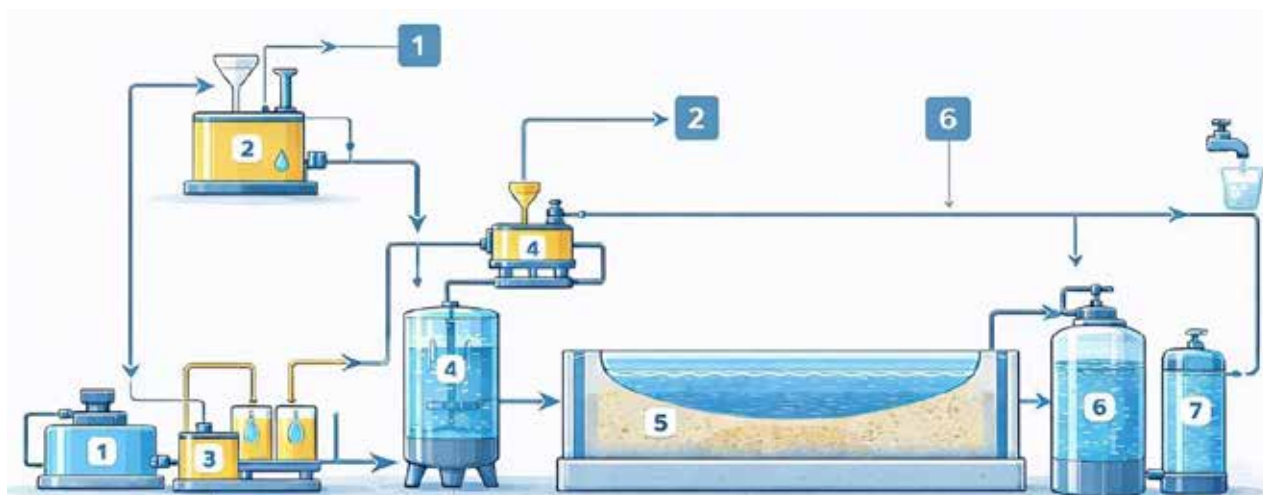


Рис. 2. Технологічна схема водопідготовки підземних вод

1 – насосна станція першого підйому; 2 – установка для дозування хлору; 3 – камера утворення та росту пластівців (флокуляції); 4 – стадія попереднього хлорування; 5 – відстійник горизонтального типу; 6 – резервуар з очищеною водою; 8 – трансформатор води до споживачів

Таблиця 1

Результати дослідження якості питної води в м. Сміла КП «ВодГео»

№ п/п	Показники	Одиниці виміру	Показники після очищення	Показники в кранах споживача	ДСанПіН 2.2.4-171-10 Не більше
1. Мікробіологічні показники					
1.	Загальне мікробне число при $t=37^{\circ}\text{C} - 24$ год.	КУО/см ³	1	1	100
2.	Загальні коліформи	КУО/см ³	відсутні	відсутні	відсутність
3.	E, coli	КУО/100см ³	відсутні	відсутні	відсутність
4.	Ентерококи	КУО/100см ³	відсутні	відсутні	відсутність
2. Органолептичні показники					
5.	Запах при 20°C та 60°C	бали	1 1	1 1	2
6.	Забарвленість	градуси	10,4	10,4	20
7.	Каламутність	Нефеломет-рична одиниця каламутності (НОК)	0,30	0,30	1
8.	Смак та присмак	бали	0	1	2
3. Фізико-хімічні показники					
9.	Водневий показник	од.рН	7,4	7,2	6,5-8,5
10.	Залізо загальне	мг/дм ³	0,11	0,18	0,2
11.	Сухий залишок	мг/дм ³	227,9	227,9	1000
4. Санітарно-токсикологічні показники					
12.	Амоній іони NH ₄ ⁺	мг/дм ³	J	J	0,5
13.	Нітрити NO ₂ ⁻	мг/дм ³	J	0,005	0,5
14.	Нітрати NO ₃ ⁻	мг/дм ³	3,5	3,8	50
15.	Перманганатна окиснюваність	мгО/дм ³	3,6	3,68	5,0

проблеми є використання альтернативних методів знезараження питної води, серед яких слід виділити озонування [20, 21].

Схему генерації озону та процесу знезараження води наведено на рисунку 3.

Необхідно зазначити, що процес озонування питної води є досить ефективною та екологічно безпечною технологією очищення, що дозволяє знищити близько 650 видів вірусів, спор та бактерій, що можуть знаходитись у воді. Знезаражувальна дія O₃ базується на його властивості високої окислювальної здатності, що визначається величиною окислювально-відновлювального потенціалу (Eh). Перевага озону в порівнянні з хлором полягає в тому, що значення окислювально-відновлювального потенціалу O₃ становить Eh=2,07 В, що в 1,5 рази є більшим за потенціал хлору (Eh=1,36 В) [22]. Саме індикатором ефективності знезараження питної води є величина окислювально-відновлювального потенціалу, що характеризує бактерицидну ефективність.

Також експериментально доведено, що до важливих характеристик озону у процесі очищення води, відноситься забезпечення ним так званого антимі-

кробного бар'єру для всіх представників патогенної мікрофлори. Використання озону на всіх етапах очищення води призводить до розкладу органічних сполук у воді, усунення присмаку та запаху, освітлення води та зменшення концентрації ХОС, які утворюються в процесі хлорування питної води. Важливою перевагою очищення питної води озоном є збільшення концентрації розчиненого кисню у воді в результаті оброблення її озоном, що надає їй присмаку джерельної води. Також до переваг даного методу оброблення питної води належить ефективність вилучення із води катіонів заліза та марганцю. Проте головною перевагою методу озонування питної води є виключення утворень канцерогенних і токсичних сполук, які призводять до онкологічних захворювань.

Тому ми вважаємо, що одним із перспективних шляхів удосконалення технологічної системи підготовки та водопостачання м. Сміла, що здійснюється КП «ВодГео», є використання озонаторної установки.

Стандартну схему очищення питної води за допомогою озону, яка може бути використана для знеза-



Рис. 3. Схема знезараження води озonom

раження питної води та вилучення надлишкового хлору й ХОС, що утворюються в процесі хлорування води, наведено на рисунку 4.

Озонаторна установка містить фільтр, функції якого полягають у знепиленні повітря, яке поступає до генератора озону. З метою забору повітря з вулиці застосовують компресор. Після очищення повітря від пилу та вологи утворюється озono-повітряна суміш, яку й використовують для швидкого очищення, що,

у свою чергу, не призводить до утворення небезпечних ХОС на відміну від технології хлорування води. Механізм знезараження питної води озonom в установці ґрунтується на процесі хімічної взаємодії розпорошеної озono-повітряної суміші з водою. Це призводить до об'ємного поглинання парів O_3 рідиною за відповідним ланцюгом хімічних реакцій.

Вважаємо, що запровадження такої технології забезпечить покращення органолептичних показників якості питної води. Слід відзначити, що у країнах ЄС близько 98% води, яка споживається населенням, знезаражується саме методом озонування. Прикладом використання методу озонування питної води в Україні є його запровадження ще в 2000 році на Дніпровській водопровідній станції м. Києва, де вперше введено в експлуатацію технологічну схему із застосуванням первинного озонування. Аналіз використання даної технології показав, що із застосуванням озону збільшується споживання електроенергії на 10%, під час його виробництва, а сумарні матеріальні витрати зростають у середньому на 9,5% (рисунок 5).

Також нами встановлено, що використання озону під час знезараження питної води забезпечує покращення її якості за багатьма показниками, проте найбільш ефективно фіксувалось зниження утворення побічних речовин, особливо залишкового заліза, на 90%, що зменшує дозу коагулянту після озонування в 10 разів. Отже, в сумарному підрахунку впровадження не призводить до значного зростання загальних ресурсних та матеріальних витрат під час технологічного процесу.

Нами проведено порівняння експериментальних досліджень показників якості води до та після використання технології первинного озонування, які представлено у таблиці 2.

Аналіз таблиці 2 показує, що в процесі озонування питної води ефективність очищення значно зростає за всіма досліджуваними показниками від 4 до 90,3 %. Зокрема, вміст загального заліза знижується більше ніж на 90%, що важливо для здоров'я людини, адже тривале вживання питної води з надмірним вмістом заліза може спричинити в деяких людей нудоту, біль у животі, метеоризм, ламкість волосся, сухість шкіри, подразнення та алергічні реакції, втому, слабкість, закрепи або діарею [23].

Аналіз техніко – експлуатаційних показників із використанням технології озонування підтверджує ефективність застосування даної технології, незважаючи на те, що відбувається деяке зростання споживання електроенергії (рисунок 6).

Отже, проведені дослідження показують, що за рахунок впровадження даної технології спостерігається не тільки покращення якісних показників води, а й скорочення сумарних витрат на процес очищення питної води, і споживання таких ресурсів як коагулянт, хлор та електроенергія, знижується на 41% (рисунок 7).



Рис. 4. Принципова схема очищення води озonom за допомогою озонаторної установки

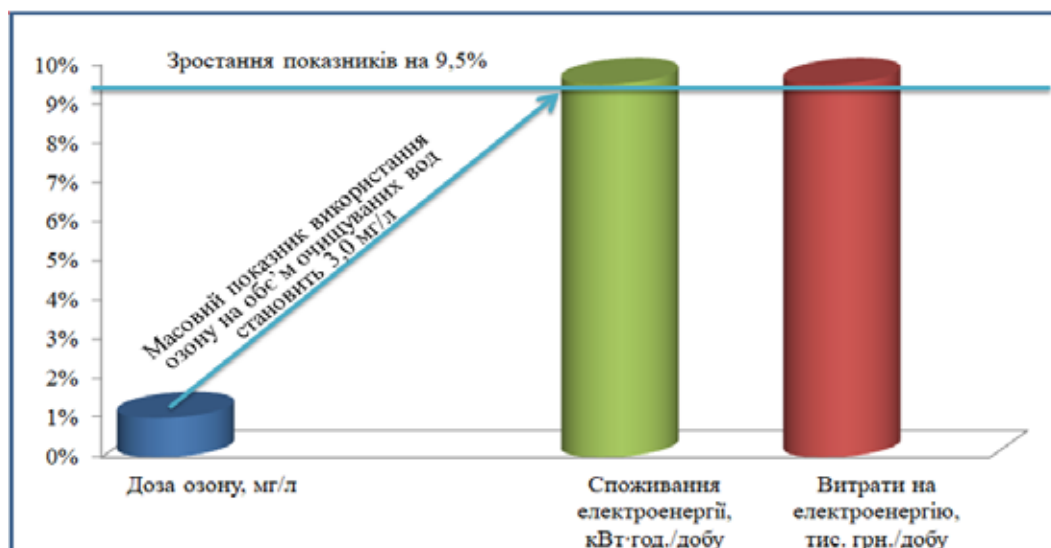


Рис. 5. Зростання витрат під час застосування технології озонування

Таблиця 2

Показники якості води в технології первинного озонування

Показник	Технологія		Зниження показника, %
	Без озону	З використанням озону	
Окиснюваність, мг/л	3,68	3,54	4
Каламутність, мг/л	1,1	<0,58	48
Кольоровість, град	12	10	17
Залізо загальне, мг/л	0,41	<0,04	90,3

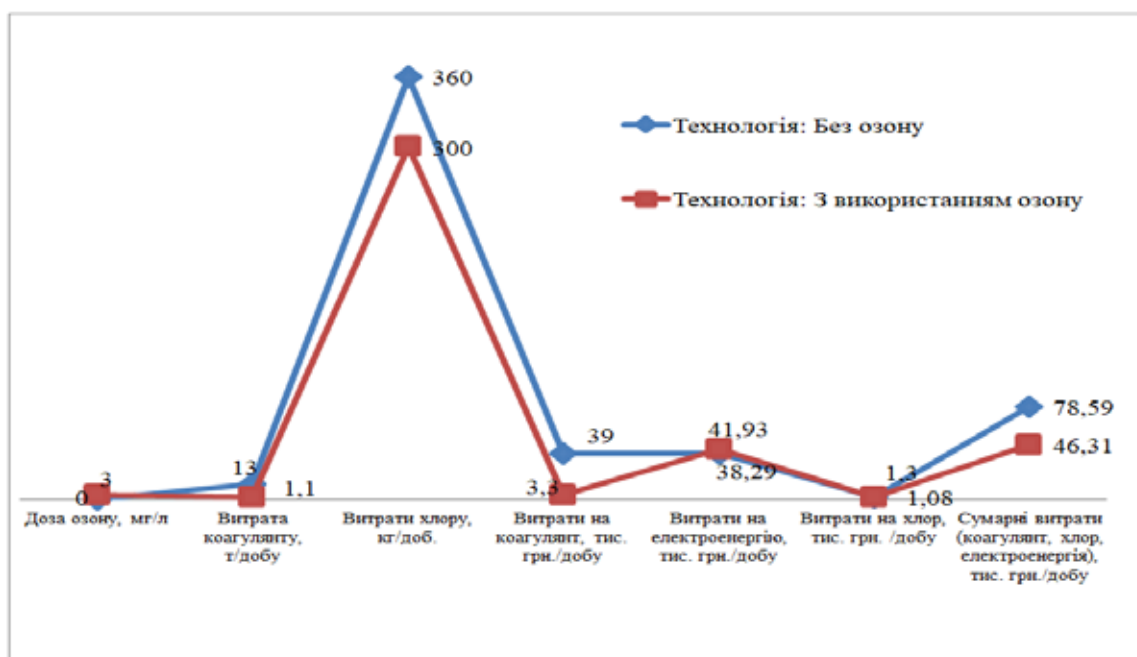


Рис. 6. Техніко-експлуатаційні показники в технології первинного озонування

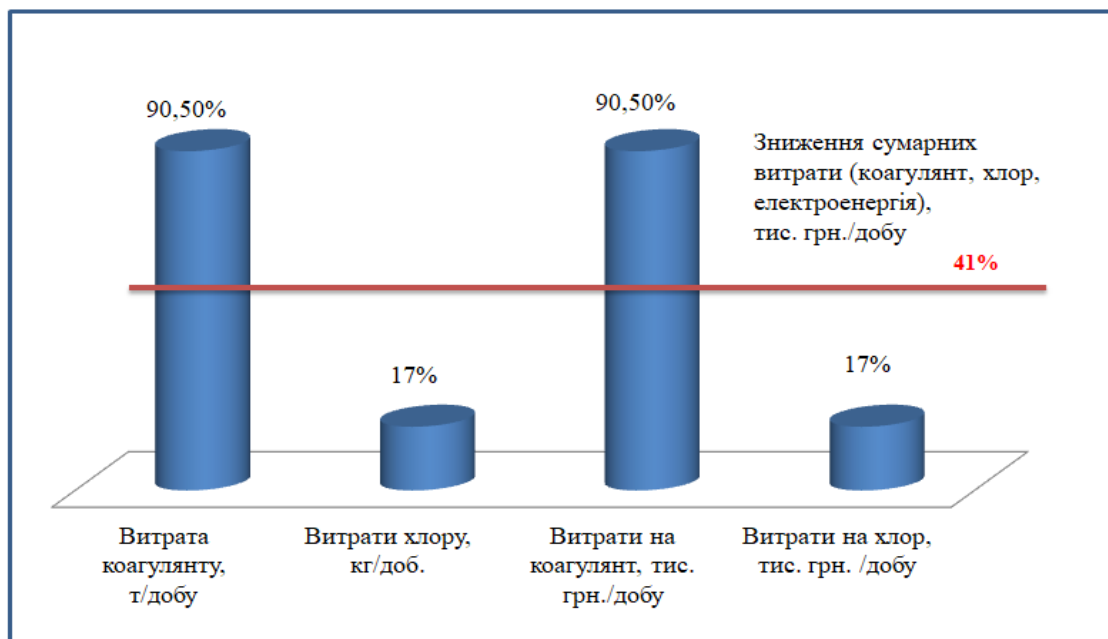


Рис. 7. Зниження техніко-експлуатаційних витрат

Проведені дослідження підтвердили, що пріоритетним напрямком для покращення якості питної води є оновлення та удосконалення систем водопостачання, будівництво і реконструкція водоочисних систем з використанням нових технологій.

Вода з підвищеним вмістом заліза є серйозною загрозою для здоров'я населення та стану побутової техніки. Тому для покращення ситуації з питною водою в м. Сміла нами розроблені рекомендації, серед яких своєчасний аналіз води і встановлення систем очищення питної води, які допоможуть оптимально видалити надлишок заліза для уникнення негативних наслідків. Якщо ж виявлено зміну смаку, кольору чи запаху води, а також відмічається утворення нальоту на сантехніці, необхідно встановлювати фільтри для видалення заліза, проводити відстоювання води, застосовувати процес природної або ж механічної аерації для окислення та видалення заліза киснем повітря чи використовувати більш дієві іонообмінні системи у побуті. Регулярний аналіз води й встановлення якісних систем фільтрації дозволять уникнути накопичення шкідливих речовин та продовжать терміни служби побутової техніки.

Головні висновки. Характерною особливістю м. Сміла є низька його забезпеченість експлуатаційними запасами підземних вод, а також відсутність поверхневих джерел для питного водозабезпечення. Тому головним джерелом водопостачання міста є підземні води, а саме розвідані запаси Смілянського та Білозірського водозаборів на території Білозірської селищної ради Черкаського району.

Згідно результатів аналізу встановлено, що вода Смілянського родовища КП «ВодГео» відповідає нормативам якості за ДСанПіН 2.2.4-171-10, проте концен-

трація амонію NH_4^+ та заліза загального не відповідає нормативам якості, а метод хлорування води характеризується рядом недоліків. По перше, знезараження питної води хлором потребує матеріальних витрат на купівлю необхідних реагентів. По друге, в процесі хлорування питна вода забруднюється хлорорганічними сполуками, до яких відносяться трихлорметани (ТХМ), хлорфеноли, хлороцтові кислоти, хлорацетонітрили, хлораміни та хлорпикрин тощо, які періодично виявляються у питній воді з показниками, що перевищують гігієнічні нормативи до якості питної води. Їх високий вміст також можна пояснити застарілим обладнанням лабораторій КП «ВодГео», а також відсутністю нормативів для ряду ХОС.

Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є застосування альтернативних технологій знезараження води, до яких можна віднести озонування. Використання озону на всіх етапах оброблення води призводить до розкладу органічних сполук у воді, її освітлення, знищення запаху та присмаку, а також зменшення вмісту побічних хлорорганічних сполук, що утворюються в процесі її хлорування.

Запропонована нами технологічна схема знезараження питної води на КП «ВодГео» з використанням озонаторної установки сприятиме не тільки покращенню органолептичних показників якості води та підвищенню ефективності технології процесу, а й зниженню техніко-експлуатаційних витрат на системи очищення на підприємстві.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати роботи можуть бути використані для впровадження технологічного процесу озонування води на діючому підприємстві та розробки проектно-кошторисної документації на проект.

Література

1. Хільчевський В.К. Глобальні водні ресурси: виклики XXI століття. *Вісник КНУ імені Т. Шевченка. Серія: Географія*. 2020. 1/2 (76/77). С. 6-16. <http://doi.org/10.17721/1728-2721.2020.76-77.1>.
2. Khilchevskiy V., Karamushka V. Global Water Resources: Distribution and Demand / In: Leal Filho W., Azul A.M., Brandli L., Lange Salvia A., Wall T. (eds). *Clean Water and Sanitation. Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals*. Springer, 2022. P. 240-250. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95846-0_101.
3. Хільчевський В.К. Управління транскордонними водними ресурсами: навч. посібник. К.: ДІА, 2024. 208 с.
4. Експерти прогнозують Україні неминучий дефіцит питної води: названо причини. *Екополітика*, 2021. URL: <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/eksperti-prognozujut-ukraini-neminuchij-deficit-pitnoi-vodi-nazvano-prichini/> (дата звернення: 10.03.2026).
5. Водний кодекс України від 6 червня 1995 р. № 213/95-ВР / Верховна Рада України. *Відомості Верховної Ради України*. 1995. № 24. Ст. 189. Поточ. ред.: 08.08.2025 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80#Text> (дата звернення: 10.03.2026).
6. Про затвердження Правил охорони підземних вод: Наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 11 травня 2023 р. № 325 / *Офіційний вісник України*. 2023. № 65, т. 2. Ст. 3736.
7. Про затвердження Державних санітарних норм та правил «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» (ДСанПіН 2.2.4-171-10) від 12 травня 2010 р. № 400 / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text> (дата звернення: 10.03.2026).
8. Черкашина М.К. Особливості правового режиму питних підземних вод України. *Науковий вісник Ужгородського Національного Університету. Серія «Право»*. 2025. Вип. 91. Ч. 2. С. 272–283. <https://doi.org/10.24144/2307-3322.2025.91.2.35>.
9. Шестопапов О.В., Сакун А.О., Лізантан П.С., Кануннікова Н.О., Гайдучек О.Г., Томашевський Р.С., Воробйов Б.В. Аналіз показників якості води: сучасні аспекти і виклики. *Екологічні науки: науково-практичний журнал*. 2024. № 3(54). С. 76 – 82. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.3-54.10>.
10. Яковлев Є.О. Регіональна оцінка територіального розподілу та екологічного стану підземних вод України (зона активного водообміну). *Водопостачання та водовідведення. Спецвипуск*. 2008. С. 46–51.
11. Про питну воду, питне водопостачання та водовідведення: Закон України від 18 травня 2017 р. № 2047–VIII / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2918-14/ed20230331#Text> (дата звернення: 10.03.2026).
12. Petrenko N.F., Mokiienko A.V., Platov S.M. Conditions of drinking water supply in Ukraine. *Актуальні проблеми транспортної медицини*. 2018. 4(54). С. 64-74. <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.2525778>.
13. Прокопов В.О. Питна вода України: медико-екологічні та санітарно-гігієнічні аспекти: монографія / за ред. А.М. Сердюка. Київ: ВСВ «Медицина», 2016. 400 с.
14. Хільчевський В.К., Забокрицька М.Р., Стельмах В.Ю. Гідроекологічні аспекти водопостачання та водовідведення: навч. посібник. Київ: ДІА, 2023. 228 с.
15. Рудько Г.І., Нецьків О.В. Водозабезпечення України підземними водами та здоров'я населення. *Медико-гідрогеохімічні чинники геологічного середовища України*: монографія/ за ред. Г.І. Рудька. Чернівці: Букрек, 2015. С. 169-356.
16. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання та водовідведення в Україні у 2024 р. / *Міністерство розвитку громад та територій України*. Київ, 2025. 449 с. URL: <https://mindev.gov.ua/storage/app/sites/1/uploaded-files/nacionalna-dopovid-pro-iajist-pitnoyi-vodi-ta-stan-za-2024-rik.pdf> (дата звернення: 10.03.2026).
17. Офіційний сайт КП «ВодГео» м. Сміла. Режим доступу: <http://vodgeo.com.ua>.
18. Стискал О.А., Петрук В.Г. Вплив хлороорганічних сполук у питній воді на злоякісні новоутворення (на прикладі Вінницької області). *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2015. № 2. С. 16 – 21. URL: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/805>.
19. Стискал О.А., Петрук В.Г. Аналіз чинників екологічної небезпеки хлорованої питної води. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2014. № 5. С. 69–75. URL: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/887/886>.
20. Яковлев І.О. Знезараження води озonom: старі проблеми і нова гіпотеза. *Екологічні науки: науково-практичний журнал*. 2024. № 6(57). – С. 197 – 200. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.6-57.29>.
21. П'ятковський Т.І., Покришко О.В., Данилков С.О. Оцінка ефективності використання озонування для знезараження прісної води. *Здобутки клінічної і експериментальної медицини*. 2023. № 4. С. 113–118. <https://doi.org/10.11603/1811-2471.2023.v.i4.14189>.
22. Epelle E.I, Macfarlane A., Cusack M., Burns A., Okolie J.A., Mackay W., Rateb M., Yaseen M. Ozone application in different industries: A review of recent developments. *Chemical Engineering Journal*. 2023. V.454. Part 2. p. 140188. doi: 10.1016/j.cej.2022.140188.
23. Чому шкідлива вода з високим вмістом заліза? – [Електронний ресурс]. – URL: <https://akvantis.com.ua/stati-i-obzory/pochemu-vredna-voda-s-vysokim-soderzhaniem-zheleza> (дата звернення: 12.03.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 25.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

ГЕОЕКОЛОГІЯ ЯК МІЖДИСЦИПЛІНАРНИЙ ІНСТРУМЕНТ ДОСЛІДЖЕННЯ РІВНЯ ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ РАДІОНУКЛІДАМИ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ

Бабенко В.М.¹, Мандрик О.М.²

¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, 61002, Харків

²Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, 76000, м. Івано-Франківськ
volodymyr.babenko@kpi.edu.ua, oleh.mandryk@nung.edu.ua

Метою дослідження є оцінка ефективності застосування геоєкології як міждисциплінарної дисципліни задля дослідження накопичення та міграції в ґрунтах радіаційних ізотопів важких металів. Зважаючи на розвиток атомної енергетики, військо-вих, медичних та наукових розробок в яких застосовують радіоактивні матеріали, зростають ризики й кількість випадків по забрудненню територій ізотопами важкими металами. Але природні та техногенні процеси приводять до розповсюдження таких специфічних забруднень на сусідні території, а опаді та ерозійні процеси приводять до здатності ізотопів мігрувати через систему ґрунтових вод до водних об'єктів і накопичуватись в мулових покладах. На 2026 рік нажалі проблема дослідження міграції ізотопів суттєво ускладнюється в зв'язку з продовженням активних бойових дій на сході та півдні території України. Потрібно підкреслити, що в таких випадках звичайний інструментальний аналіз досить складний, тому на нашу думку доцільно використовувати міждисциплінарні підходи моніторингу довкілля. Методика дослідження базується на поєднанні сучасних методів які застосовують в екології, географії та біології, що спираються на знання з територіальної міграції хімічних елементів, які корелюються з топографією місцевості та дослідженням рослин у ролі індикаторів важких металів. Географічні відомості окреслюють зони міграції хімічних елементів, а знання біології рослин забезпечують виявлення забруднених ділянок з застосуванням простого обладнання, що спрощує моніторингові дослідження. Так з однієї сторони географія місцевості звужує зону дослідження, а сучасні методи біологічної індикації дають гарні оцінки по забрудненню радіацій-ними ізотопами важкими металами. Поєднання таких методів в геоєкології дає можливість оперативного виявлення забруд-нених ділянок без застосування складного стаціонарного лабораторного обладнання. Досліджено, що при поєднанні знання топографії місцевості з екологічними методами по біологічній індикації таких достатньо розповсюджених рослин як мохи, лишайники, водні бурі та червоні макрופіти, що мають властивості по акумуляції в собі важких металів, ефективність таких методів суттєво зростає в порівнянні з традиційними хімічними та фізико-хімічними методами. У результаті встановлено, що при поєднанні методів геоєкології та біологічної індикації зростає ефективність виявлення важких металів. Для ґрунту та береговому мулу поблизу водних об'єктів високу чутливість демонструє Очерет звичайний – *Phragmites australis*, а для ставків та болота підходить звичайна Ряска мала – *Lemna minor*, яка здавна використовується акваріумістами у якості простого індикатора чистоти води. Безумовно при поєднанні методів геоєкології з фізико-хімічним аналізом зростає точність оцінки забруднення ізотопами. На практиці визначено оптимальне поєднання методів топографії місцевості та рослин-індикаторів з характерними властивостями по біологічній акумуляції к ізотопам важких металів, що спрощує розробку стандартизованих підходів в радіологічному моніторингу місцевості. Практична значимість: поєднання методів геоєкології та біології дозволяє простіше та з меншим витратами виявляти забруднення територій ізотопами важких металів, що в підсумку знижує ризики як для людей, так і для екосистем. Використання геоєкології у вигляді міждисциплінарного інструменту сприяє безпечному використанню природних земельних та водних ресурсів та забезпечує економічну вигоду для якісного природного моні-торингу. Результати дослідження можуть бути використані як для розробки методів екологічного моніторингу в Україні, так і для стратегій очищення територій забруднених ізотопами важких металів. **Ключові слова:** геоєкологія; ґрунти; радіоактивні ізотопи важких металів; моніторинг; забруднення довкілля.

Geoecology as an interdisciplinary tool for studying the level of soil contamination by heavy metal radionuclides. Babenko V., Mandrykh O.

The purpose of the study is to assess the effectiveness of using geoecology, an interdisciplinary discipline, to examine the accumulation and migration of radioactive heavy-metal isotopes in soils. Given the development of nuclear energy, as well as military, medical, and scientific applications that use radioactive materials, the risks and number of cases of contamination of territories with heavy-metal isotopes are increasing. However, natural and anthropogenic processes spread this specific pollution to neighboring regions, and precipitation and erosion facilitate the migration of isotopes through the groundwater system to water bodies and their accumulation in silt deposits. Unfortunately, by 2026, the problem of studying isotope migration will be significantly complicated



by the continuation of active hostilities in the east and south of Ukraine. It should be emphasized that in such cases, conventional instrumental analysis is quite complicated, therefore, it is advisable to use interdisciplinary approaches to environmental monitoring.

The research methodology is based on a combination of modern methods from ecology, geography, and biology, which rely on knowledge of the territorial migration of chemical elements, correlated with the area's topography and the distribution of plants as indicators of heavy metals. Geographical information outlines the migration zones of chemical elements, and knowledge of plant biology enables the detection of contaminated areas using simple equipment, thereby simplifying monitoring studies. So, on the one hand, the area's geography narrows the study area, and modern methods of biological indication provide reasonable estimates of contamination with radioactive isotopes of heavy metals. The combination of these methods in geoecology enables quick detection of contaminated areas without the need for complex stationary laboratory equipment. It was found that when combining knowledge of the area's topography with ecological methods for biological indication of mosses, lichens, water sedges, and red macrophytes, which accumulate heavy metals, the effectiveness of these methods increases significantly compared to traditional chemical and physico-chemical methods. As a result, it was found that combining geoecological methods with biological indicators increases the effectiveness of detecting heavy metals. For soil and coastal silt near water bodies, Common Reed – *Phragmites australis* demonstrates high sensitivity, and for ponds and swamps, Common Duckweed – *Lemna minor* is suitable, which has long been used by aquarists as a simple indicator of water purity. Of course, when combining geoecological methods with physico-chemical analyses, the accuracy of assessing isotope contamination increases. Scientific novelty: the combination of geoecological and biological methods deepens understanding of the effectiveness of biological indicators for monitoring pollution by heavy metal isotopes. In practice, the optimal combination of terrain topography and indicator plants with characteristic properties for the biological accumulation of heavy metal isotopes has been determined, which simplifies the development of standardized approaches for radiological monitoring of terrain. Practical significance: the combination of geoecological and biological methods enables easier, less costly detection of pollution in territories contaminated with heavy metal isotopes, ultimately reducing risks to both people and ecosystems. The use of Geoecology as an interdisciplinary tool contributes to the safe use of natural land and water resources and provides economic benefits for high-quality natural monitoring. The results of the study can be used both to develop environmental monitoring methods in Ukraine and to develop strategies for cleaning up territories contaminated with heavy metal isotopes. *Key words:* geoecology; soils; radioactive isotopes of heavy metals; monitoring; environmental pollution.

Постановка проблеми. Виклики сьогодення вимагають в потребі ефективних та при цьому простих методів по контролю за розповсюдженням і міграцією важких металів, особливо це стосується їх радіаційних ізоотопів. Якщо для водних середовищ міграційні процеси проходять достатньо швидко, за рахунок властивості самої води та зміни сезонів і опадів, то для ґрунту потрібно враховувати ще такі додаткові параметри як топографія місцевості, властивості глибинних шарів ґрунту, водоносні горизонти та інше. По своїм хімічним властивостям ізоотопи важких металів суттєво не відрізняються від своїх стабільних елементів, а в роботі [1] досліджено що в Україні, внаслідок проведення бойових дій, в ґрунтах вміст важких металів більший ніж фонові концентрації від 1,4 раз для *Cd*, до 5,4 раз для *Pb*. І це відомості на 2022 рік, а з урахуванням чотирьох років повномасштабної війни в зоні бойових дій ці цифри стали тільки більші.

На сьогодні відомо, що у військових діях в Україні використовуються матеріали які містять радіаційні ізоотопи хімічних елементів. Окремим пунктом є відомості порушення ґрунтів окупаційною армією РФ навесні 2022 року в Чорнобильській зоні відчуження. Сам факт риття окопів та бліндажів в радіаційне засмічених ґрунтах вже є порушенням всіх міжнародних екологічних норм, а потрапляння забрудненої землі на поверхню приводить до розповсюдженню ізоотопів важких металів на оточуючі території. В зоні відчуження практично всі біологічні види деревної та трав'яної рослинності мають або мутаційні зміни, або акумулюють в собі цілий спектр радіаційних штучних і природних ізоотопів. Ще в XX столітті для експрес моніторингу забруднення води та ґрунтових мулів використовували аналітичні й біологічні

методи біологічних маркерів, завдяки яким можна зробити топографічну мапу міграції, поширення та поглинання хімічних елементів рослинами [2]. Саме такий підхід використовується в геоєкології при поєднанні топографії місцевості та екологічних і біологічних знань. При використанні аналітичних методик практично завжди отримують гарні результати, але є і свої складності: для цього потрібно окрім спеціалізованого персоналу ще й складне та коштовне обладнання, що звичайно не завжди є в наявності або неможливо доставити на експериментальну ділянку. А ось при використанні знання про зв'язок між топографією місцевості, міграцією радіаційних ізоотопів важких металів та рослинами що є біологічними маркерами, дослідницькі місії набагато спрощуються.

Актуальність дослідження. На сьогодні знання про топографію місцевості суттєво прискорюють пошук наземних або водних рослин що слугують у якості біологічного індикатора по важким металам, а головними вимогами до таких дерев та трав є наступні пункти. По-перше, такі рослини повинні бути звичайними та доступними для своєї місцевості, мати високу швидкість росту, що може дати для екологічного моніторингу статистичні відомості про вміст забруднюючого компоненту, наприклад по ізотопам цезію та стронцію. По-друге, рослини повинні при таких вищеперерахованих параметрах витримувати, накопичувати та залишати в своїх біологічних тканинах необхідні для дослідження ізоотопи важких металів в значних масових долях до 1 г на 1 кілограм своєї ваги в перерахунок на суху масу.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Тема дослідження відповідає «Цілі сталого розвитку:

Україна», де прописано, що 40% площі країни належать до території екологічної мережі. Необхідність забезпечення, відновлення збереження та сталого використання земель, природних екосистем, сталого управління лісами, саме ці завдання закріплені у Національній доповіді по сталому управлінню лісами в Україні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З проблемами моніторингу по забрудненим територіям, включно і з радіаційними ізотопами важких металів, стикались і в країнах Євросоюзу. Систематизований підхід по відновленню стану ґрунту почали займатись в країнах східної Європи з 1998 року – ремедіація територій Чехії привела до встановлення стандартів, а потім набула статусу необхідної складової при приватизації ділянок. Такий принцип дослідження що поєднує в собі топографію місцевості, біологію та екологію фактично і є геоєкологією та має схожість з біологічною ремедіацією ґрунтів, що вже використовується в Чехії [3] та інших країнах Європи.

Виходячи з самої суті – моніторинг забруднення навколишнього середовища радіонуклідами важкими металами є необхідним першим кроком для розробки стратегій контролю за станом довкілля. Задля подолання таких викликів є сенс використовувати топографію місцевості та рослини і таким чином збирати необхідну інформацію про ступінь забруднення радіаційними ізотопами важкими металами [3]. В дослідженнях роботи [4] підтверджується можливість ефективно оцінювати вміст в ґрунтах концентрацію важких металів, а так як в хімічних сполуках стабільні та радіаційні ізотопи металів поведуть себе схоже, то й біологічна акумуляція в коріння рослин з ґрунтів проходить схожим чином. Процеси міграції хімічних речовин в ґрунтах та поверхневих водах корелюються з накопиченням таких елементів в частинах рослин [4].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Лабораторні аналітичного методи якісного та кількісного хімічного аналізу є досить точними, але вимагають сучасного обладнання, достатньо рідкісних або коштовних реактивів, а саме головне підготовленого персоналу. Нажаль такі фактори обмежують застосування фізико-хімічних та хімічних методик, особливо в сучасних польових умовах поблизу проведення військових дій і недостатнього фінансування. Саме це спонукає шукати прості та надійні альтернативні підходи, що використовуються в світі для дослідження ґрунтів. Європейський досвід у методах біоіндикації дозволяє ефективно, з меншими витратами та швидко оцінити екологічний стан ґрунтів на місцевості. Відпрацьовані методики, що базуються на реакціях рослин на хімічні елементи в ґрунтах, на сьогодні дають схожі результати з лабораторними аналізами значно скорочуючи час на дослідження.

Наукова новизна. Поєднання методів геоєкології та біології поглиблює розуміння ефективності біологічної індикації у якості методів моніторингу забруднення ізотопами важких металів. Головною проблемою залишається виявлення зв'язків концентрацій радіонуклідів важких металів та реакцією рослин на них, вперше проведено моніторингове дослідження, що пов'язує в собі геоєкологія при вивчені процесів міграції хімічних елементів та сполук в навколишньому середовищі.

Метою дослідження є оцінка ефективності моніторингу застосування рослин біомаркерів у визначенні територій, що мають ґрунти з підвищеним вмістом радіаційних нуклідів важких металів.

Об'єктом дослідження є поверхневі шари ґрунтів, що мають в собі забруднення ізотопами важких металів.

Предметом досліджень є оцінка ефективності застосування в методах біологічної індикації рослин біомаркерів для екологічного моніторингу територій забруднених радіаційними ізотопами важких металів.

Викладення основного матеріалу. В звичайному природному середовищі радіаційні нукліди легких ^{40}K та в тому числі й важких металів ^{232}Th , ^{238}U , знаходяться у розсіяному вигляді або в рудах, що знаходяться глибоко під поверхнею. В такої концентрації вони не несуть небезпеку та встановлюють звичайний природний радіаційний фон, що в різних місцях нашої планети може відрізнятися, як раз за рахунок географічних та метеорологічних особливостей місцевості: молоді гірські формації, виходи на поверхню вулканічних порід, водні ерозійні процеси оголення раніше глибинних шарів, тощо. Практична більшість важких металів, що потрапляють в навколишнє середовище – це антропогенна діяльність різних людини: ядерна енергетика, промисловість, будівництво та нажалі наслідки військових дій, а також техногенні катастрофи [5–7].

Природні концентрації важких металів наприклад свинцю, до якого природнім шляхом розпадаються ^{232}Th , ^{238}U складає для ґрунтів від 10 до 50 мг на 1 кг сухої породи в залежності від геологічного району. Але завдяки використанню бензинів з тетраетилем свинцю його почали реєструвати навіть в Гренландії, а його концентрація в повітрі зросла в 10 разів до значення більш ніж 1000 нг/м³ для промислових міст. Дослідження вмісту свинцю в навколишньому середовищі має кореляцію з ураном-238, природна концентрація якого знаходиться в межах від 1 до 3 мг на 1 кг ґрунту, виключенням є граніти де концентрація досягає 10 мг/кг.

В складі верхнього шару ґрунту метали з порядковим номером 26 (*Fe*) та більше впливають на такі параметри землі як: *pH*, іонообмінні процеси, щільність та текстура, ріст і метаболізм мікробів. Такі зміни приводять до погіршення характеристик ґрунтів, що можна реєструвати рослинами біологічними індикаторами [8]. Специфічні симптоми або мор-

фологічні зміни рослин, прикладом яких частіше є лишайники та мохи, у яких за рахунок довготривалого життя та малої швидкості росту простіше виявляти зміни, використовують для сільської місцевості.

Попередні дослідження показали, що накопичення ізотопів важких металів у частинах рослин, таких як листя, стебла або коріння, на пряму вказує на екологічний ризик збільшення концентрації в ґрунтах таких хімічних елементів. Для такого моніторингу підходять судинні рослини наступних видів:

– папороті для лісових систем у вигляді пробовідбірника та біологічного індикатора мікроелементів в ґрунтах та повітрі;

– очерет звичайний (*Phragmites australis*) болотна рослина що відмінно себе почуває і на узбережжі природних та штучних водоймищ, що є відмінним акумулятором важких металів, у тому числі й радіаційних ізотопів цезію-137 та стронцію-90, а також міді-64 та стабільного хрому-52;

– рдесник плаваючий (*Potamogeton natans*), розповсюджений в північній півкулі, біологічний індикатор для моніторингу міграції радіаційних та стабільних ізотопів важких металів з ґрунтів до водних об'єктів та донних відкладень, стійкий до високих концентрацій свинцю.

Проведений аналіз, згідно з даними відомих джерел інформації, дозволяє стверджувати, що при вираховуванні хелаторів – природних рослинних сполук які зв'язують іони металів та утворюють стабільні комплекси [9] вищеперераховані рослини здатні виконувати роль індикаторів антропогенного забруднення ізотопами важких металів, таблиця 1.

Концентрації радіаційних ізотопів важких металів, що створюють реакції в рослинах можуть відрізнятися, це в першу чергу пояснюється як рівнем кислотності та розчинності іонів в ґрунтах, води або донних відкладень, так і відмінностями самих підвидів рослинного царства.

Поєднання геоєкології та біологічного моніторингу дозволяє створити методи дослідження довкілля, що базуються на економічно вигідних, достатньо простих, перспективних та достатньо екологічно безпечних методиках оцінки забруднення ґрунтів радіаційними ізотопами важкими металами. Використання достатньо розповсюджених рослин, таких як папороть (*Polypodiophyta*) в лісових еко-

системах, очерет звичайний (*Phragmites australis*) на стиках лугових та болотних біомів, Рдесник плаваючий (*Potamogeton natans*) на мілинах водоймищ поблизу об'єктів дослідження, або лишайників та мохів у якості біологічних індикаторів, дозволяє виявляти перевищення ГДК по забруднюючим речовинам, а також оцінювати їх міграцію, здатність до акумуляції рослинами та токсичність для біологічних індикаторів. Зокрема, дослідження показали, що очерет звичайний дуже нерівномірно накопичує в своїх частинах важкі метали, скачками реагуючи на зміни в показниках навколишнього середовища. Здатність накопичувати в собі важкі метали та радіаційні ізотопи вже використовується в біоремедіації для очищення забруднених ґрунтів. Цей достатньо новий біологічний підхід детоксифікує шкідливі речовини, як приклад і важкі метали, відновлюючи екосистеми на самих територіях. Такі методи важливі ще й тому, що географія забрудненої місцевості доволі змінна, відповідно використання рослин надає перевагу і як бонус зменшує процеси вітрової та водної ерозії, не дозволяє ізотопам важких металів мігрувати та розповсюджуватись на прилеглих територіях.

Якщо зробити порівняння з класичними хімічними та фізико-хімічними методами, що в своїй більшості використовуються як зразкові в лабораторних умовах, природно рослинна біологічна індикація мають ряд переваг, а саме: нижча вартість, особливо в сучасних умовах повномасштабних військових дій, стає дуже важливим фактором; для біотестування необхідна менша потреба в складному та коштовному лабораторному обладнанні; і останнє це швидка можливість виявлення забруднених ділянок прямо на місці, практично одразу в польових умовах. Прикладом є папороть – рослина яка вдома та розповсюджена доволі широко в лісових та чагарникових біомах, особливо на північних схилах з низькою освітленістю. Використання папороті оперативно дозволяє оцінювати екологічне забруднення завдяки їх розповсюдженості та швидкому росту, а накопиченню металів у тканинах надає можливості зібрати проби та провести повномасштабні дослідження вже в лабораторних умовах з отриманням точних результатів.

Практичне значення рослин у ролі біологічних індикаторів складно переоцінити, а стійкість

Таблиця 1

Рослини біоіндикатори ізотопів хімічних елементів

№ п/п	Біологічний індикатор	Ізотоп та біологічна реакція рослини
1	Папороть (<i>Polypodiophyta</i>)	^{137}Cs , ^{90}Sr – усихання та пожовтіння кінцівки листя, пригнічення росту, у дорослих рослин менша висота на 10-15 см
2	Очерет звичайний (<i>Phragmites australis</i>)	^{243}Am , ^{235}U – при концентраціях що в 2 рази перевищують фонові рівні спостерігається зниження росту та розвитку рослини, що підтверджується накопиченням ізотопів в кореневій системі
3	Рдесник плаваючий (<i>Potamogeton natans</i>)	^{64}Cu , ^{137}Cs – при концентраціях що в 1,5 рази перевищують фонові рівні вже спостерігається крихкість та зменшення розмірів листяної поверхні

і витривалість деяких з них до високих концентрацій радіаційних ізотопів важких металів дозволяє підтримувати стає використання ґрунтів та природних земельних ресурсів, які за рахунок продовження військових дій в Україні зменшилися на 20%. Просте своєчасне виявлення земельних ділянок забруднених ізотопами важких металів дозволяє провести ізоляцію їх від сільськогосподарського використання тими ж самими рослинами. Утворення лісосмуг дозволяє мінімізувати розповсюдження ізотопів та зменшити ризик для здоров'я мешканців населених пунктів, що знаходяться поруч і в цілому знизити навантаження на сусідні екосистеми.

Висновки. Рослини в Україні є невід'ємним компонентом ґрунтового покриву практичної більшості географічних ландшафтів, саме тому роль біологічної індикації або використання знання про рослини біомаркери є перспективним напрямком розвитку геоєкології, ландшафтною та загальною екологією, доволі простим та ефективним інструментом вивчення довкілля. Економічна вигода та екологічна безпека такої методики, задля виявлення радіаційних ізотопів важких металів в поверхневих шарах ґрунтів, виставляє такі методи в перші ряди для

сучасного використання в різних географічних регіонах. Використання простих та розповсюджених рослинних живих організмів, як приклад видів папороті, дозволяє простіше виявляти забруднені географічної земельної лісової ділянки, швидко зібрати проби на наявність ізотопів важких металів без необхідності перевозити з собою складне лабораторне обладнання. Зазвичай рослини можуть змінюватись і лабораторні аналізи підтверджують негативний або позитивний результат, але краще дослідження проводити в спеціалізованих лабораторіях ніж в польових умовах.

Наприкінці треба додати, що звичайні, усім відомі рослини, такі як папороті, мохи та лишайники виявляються не такими вже й простими, а цінними біологічними індикаторами. Їх недостатньо вивчені властивості до біоаккумуляції ізотопів металів, витривалість та терпимість до токсикантів, здатність адаптуватись до складних екологічних умов надають перспективні шляхи розвитку біології та геоєкології. Властивості біоіндикаторів накопичувати та затримувати в собі метали у високих концентраціях, на сьогодні є досить привабливою темою для майбутніх досліджень в цьому напрямку.

Література

1. Zaitsev Yu., Hryshchenko O., Romanova S., Zaitseva I. Influence of combat actions on the content of gross forms of heavy metals in the soils of Sumy and Okhtyrka districts of Sumy region. *Agroecological Journal*. 2022. Vol. 3. P. 136–149. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2022.266419>.
2. Kadadou D., Tizani L., Alsafar H., Hasan S. W. Analytical methods for determining environmental contaminants of concern in water and wastewater. *MethodsX*. 2024. Vol. 12. P. 102582. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mex.2024.102582>.
3. Cakaj A., Lisiak-Zielińska M., Hanć A., Małecka A., Borowiak K., Drapikowska M. Common weeds as heavy metal bioindicators: a new approach in biomonitoring. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13, № 1. P. 6926. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34019-9>.
4. Cakaj A., Drzewiecka K., Hanć A., Lisiak-Zielińska M., Ciszewska L., Drapikowska M. Plants as effective bioindicators for heavy metal pollution monitoring. *Environmental Research*. 2024. Vol. 256. P. 119222. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119222>.
5. Yashchenko L., Androshchuk O., Vasylenko L., Chornoivan Y. Environmental risks of heavy metal pollution in war-affected soils in Ukraine. *European Journal of Environmental Sciences*. 2025. Vol. 15, № 1. P. 18–27. DOI: <https://doi.org/10.14712/23361964.2025.3>.
6. Rao J. N., Parsai T. Pollution and toxicity of heavy metals in wildfires-affected soil and surface water: a review and meta-analysis. *Environmental Pollution*. 2025. Vol. 369. P. 125845. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.125845>.
7. Singh V., Ahmed G., Vedika S., Kumar P., Chaturvedi S. K., Rai S. N., Vamanu E., Kumar A. Toxic heavy metal ions contamination in water and their sustainable reduction by eco-friendly methods: isotherms, thermodynamics and kinetics study. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14, № 1. P. 7595. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58061-3>.
8. Ali S. Effects of heavy metals on soil properties and their biological remediation. *Indian Journal of Pure & Applied Biosciences*. 2022. Vol. 10, № 1. P. 40–46. DOI: <https://doi.org/10.18782/2582-2845.8856>.
9. Чисте повітря для України. *Copernicus Global Climate Highlights Report 2024* : URL: <https://www.copernicus.eu/en/news/news/copernicus-global-climate-report-2024-confirms-last-year-warmest-record-first-ever-above> (дата звернення: 17.02.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 26.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

ПРИРОДНО-РЕСУРСНИЙ ПОТЕНЦІАЛ УКРАЇНСЬКИХ ЕТНІЧНИХ (ІСТОРИКО-ГЕОГРАФІЧНИХ) ЗЕМЕЛЬ У СУЧАСНОМУ ВИМІРІ

Руденко С.В., Руденко В.П.

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

вул. Коцюбинського, 2, 58002, м. Чернівці

s.rudenko@chnu.edu.ua, v.rudenko@chnu.edu.ua

Стверджується, що природно-ресурсний (ПРП) у складі мінеральних, водних, земельних, лісових, фауністичних та природно рекреаційних ресурсів, є однією з найважливіших характеристик, що відображає усеагальні продуктивні сили українських етнічних (історико-географічних) земель. Станом на 01.01.2022р. оцінюється у вартісних показниках величина, компонентна структура, територіальна та економічна продуктивність ПРП 13 історико-географічних земель України: Закарпаття, Галичини, Волині, Буковини, Поділля, Київської землі (Правобережної України), Центрально-Лівобережної України, Харківщини (Слобожанщини), Донеччини, Запоріжжя (Дніпровщини), Одещини, Центрального Причорномор'я (Чорноморської низини) та Криму. Обґрунтовується, що за величиною ПРП до першої п'ятірки входять Донеччина, Запоріжжя (Дніпровщина), Київська земля (Правобережна Україна), Центрально-Лівобережна Україна та Поділля, що зосереджують 2/3 усіх природних багатств держави. Найменший ПРП концентрують (у порядку спадання величини потенціалу): Харківщина (Слобожанщина), Одещина, Волинь, Закарпаття та Буковина (Чернівецька область) (сумарно 15,2%). Наголошується, що найтипівішими для історико-географічних земель України є: мінерально-земельно-водний природно-ресурсний комплекс (Донеччина та Запоріжжя (Дніпровщина)), земельно-водно-рекреаційний (Київська земля (Правобережна Україна), Волинь, Галичина, Центральне Причорномор'я (Чорноморська низина)), земельно-рекреаційно-водний комплекс (Харківщина (Слобожанщина), Буковина, Одещина та Крим). За територіальною продуктивністю ПРП, розрахованою як обсяг потенціалу на одиницю площі у порівнянні з показником по Україні, прийнятим за 100 балів, серед земель першими є Донеччина (239 балів), Запоріжжя (Дніпровщина) (151 бал) та Крим (133 бали), з протилежного боку – Одещина (68 балів), Центральне Причорномор'я (Чорноморська низина) (66 балів) та Волинь (52 бали). Економічна продуктивність ПРП найвища серед історико-географічних земель України на Донеччині (140 балів), Запоріжжі (Дніпровщині) (130 балів) та в Криму (128 балів), значно нижчими є її показники на Харківщині (Слобожанщині) (70 балів), Київській землі (Правобережна Україна) (67 балів) та на Буковині (Чернівецька область) (65 балів). Оцінка ПРП стає, таким чином, підґрунтям для обґрунтування перспективних можливостей збалансованого природно-ресурсного розвитку історико-географічних земель України. *Ключові слова:* природно-ресурсний потенціал, українські етнічні (історико-географічні) землі, збалансоване природокористування.

Nature-resource potential of Ukrainian ethnic (historic-geographical) lands in present-day dimension. Rudenko S., Rudenko V.

It is stated that nature-resource potential (NRP) as combination of mineral, land, water, forest, fauna and natural recreation resources is among the most important characteristics that highlight the overall productive forces of Ukrainian ethnic (historic-geographical) lands. The cost figures of the size, component structure, territorial and economic productivity of the NRP as of 01.01.2022 are presented for 13 historic-geographical lands of Ukraine, namely, Zakarpattia, Halychyna, Volyn, Bukovyna, Podillia, Kyiv Land (Right-Bank Ukraine), Central-Left-Bank Ukraine, Kharkivshchyna (Slobozhanshchyna), Donechchyna, Zaporizhzhia (Dniprovshchyna), Odeshchyna, Central Prychornomorya (Chornomorska Lowland), and the Crimea. It is substantiated that, with regard to NRP size, Donechchyna, Zaporizhzhia (Dniprovshchyna), Kyiv Land (Right-Bank Ukraine), Central-Left-Bank Ukraine, and Podillia form the top-5 historic-geographical lands that concentrate 2/3 of the whole wealth of the state. The least NRP (descending order of the potential's size) is observed in Kharkivshchyna (Slobozhanshchyna), Odeshchyna, Volyn, Zakarpattiam and Bukovyna (the present-day Chernivtsi Oblast) (15,2% in aggregate). It is emphasized that the most typical for Ukrainian historic-geographical lands are the nature-resource complexes as follows: mineral-land-water complex (Donechchyna and Zaporizhzhia (Dniprovshchyna)), land-water-recreation complex (Kyiv Land (Right-Bank Ukraine), Volyn, Halychyna, Central Prychornomorya (Chornomorska Lowland)), and land- recreation-water complex (Kharkivshchyna (Slobozhanshchyna), Bukovyna, Odeshchyna, and the Crimea). With regard to NRP territorial productivity calculated as the potential's size per unit of territory in comparison to the same parameter for Ukraine taken as 100 points, the leading positions are taken by Donechchyna (239 points), Zaporizhzhia (Dniprovshchyna) (151 points), and the Crimea (133 points), whereas the least territorial productivity is manifested by Odeshchyna (68), Central Prychornomorya (Chornomorska Lowland) (66), and Volyn (52 points). As to NRP economic productivity, its highest figures were observed in Donechchyna (140 points), Zaporizhzhia (Dniprovshchyna) (130 points), and the Crimea (128 points), while significantly lower figures were manifested by Kharkivshchyna (Slobozhanshchyna) (70), Kyiv Land (Right-Bank Ukraine) (67), and Bukovyna (the present-day Chernivtsi Oblast) (65 points). Thus, the NRP evaluation becomes the basis for substantiation of the perspectives of balanced nature-resource development of historic-geographical lands of Ukraine. *Key words:* nature-resource potential, Ukrainian ethnic (historic-geographical) lands, balanced nature use.



Вступ. Постановка проблеми та її актуальність. На нинішньому етапі суспільного розвитку «практичний інтерес до українських історичних (етнічних, етнографічних) земель, особливостей їх зародження і розвитку зростає у зв'язку з вирішенням прикладних питань удосконалення адміністративно-територіального устрою, підвищенням ефективності територіального управління, розв'язанням актуальних питань національно-культурного розвитку регіонів тощо. Саме через історичну наступність простежується пряма залежність між історичним і теперішнім адміністративно-територіальним устроєм сучасної України і прилеглих до неї українських історичних земель», – стверджував відомий український вчений Ф.Д. Заставний [1, с. 349]. Актуальність таких досліджень особливо зростає в умовах російської агресії проти незалежної України, коли вирішуються найскладніші проблеми захисту її територіальної цілісності. Серед багатьох нерозв'язаних питань, пов'язаних з українськими історико-географічними землями, є пізнання їх природно-ресурсного потенціалу, його величини, структури, економічної і територіальної продуктивності.

Сучасних стан вивченості питання.

Основна увага дослідників проблем українських етнічних (історико-географічних) земель зосереджувалась на питаннях: просторового окреслення їх меж; політико-адміністративного чи територіально-адміністративного устрою; економічного районування та управління; історичного та господарського розвитку; пізнавально-красназавчих, виховних тощо. Слід назвати у цьому зв'язку праці М. Грушевського [2], С. Рудницького [3], В. Кубійовича [4], Ф. Заставного [1], М. Дністрянського та Н. Дністрянської [5], Я. Верменич [6] та О. Косміної [7]. Разом з тим наявні можливості природно-ресурсного розвитку на українських історико-географічних землях досліджені ще недостатньо. Особливо це стосується пізнання сучасного стану природних ресурсів у галузях природокористування. Оцінити величину, структуру, визначити територіальну та економічну продуктивність природно-ресурсного потенціалу українських історико-географічних земель, що охоплює мінеральні, водні, земельні, лісові, фауністичні та природні рекреаційні ресурси в сучасному вимірі – **основна мета нашого дослідження.**

Матеріали та методи дослідження. В основу розрахунку величини ПРП українських історико-географічних земель покладені матеріали вартісної переоцінки потенціалу природних ресурсів України, що була проведена нами у розрізі 278 природних районів, 57 областей, 14 країв (провінцій), 3 підзон, 4 зон, 3 країн держави станом на 01.01.2022р. [8]. Одним з найважливіших методичних підходів, який слід було реалізувати в процесі нашого дослідження, стало визначення та обґрунтування регіональної структури українських етнічних (історико-географічних) теренів, самих назв

та меж українських земель. Йдеться про більш подрібнений поділ української етнічної території. Як відомо, М. Грушевський виокремлював 30 українських земель [2], С. Рудницький – 16 земель [3], В. Кубійович – 16 історико-географічних країв [4]. Сучасні дослідники, зокрема Я.В. Верменич, подає узагальнену схему регіоналізації України, виділяючи Правобережну Україну (Київщина, Волинь, Поділля), Західну Україну (Галичина, Буковина, Закарпаття, Холмщина і Підляшшя), Лівобережну Україну (Чернігівщина, Полтавщина), Слобідську Україну (Харківщина, Сумщина), Південну Україну (Запоріжжя, Причорномор'я, Приазов'я, зокрема Донеччина, Буджак, Бессарабія, Крим) [6]. Ф.Д. Заставний вичленовує 16 українських етнічних земель [1], М. Дністрянський та Н. Дністрянська обґрунтовують 12 етногеографічних районів у межах України [5]. Наявні і інші пропозиції стосовно ідентифікації українських історико-географічних регіонів [7; 9-10]. На підставі узагальнення існуючих схем регіоналізації земель в межах України нами оцінений ПРП за такими етнічними територіальними спільнотами: Закарпаття; Галичина (у складі Львівської, Івано-Франківської та Тернопільської адміністративних областей); Волинь (Волинська та Рівненська області); Буковина (Чернівецька область); Поділля (Хмельницька, Вінницька та Житомирська області); Київська земля (Правобережна Україна) (Київщина, Черкащина, Кіровоградщина); Центрально-Лівобережна Україна (Чернігівщина, Сумщина, Полтавщина); Харківщина (Слобожанщина); Донеччина (Донецька та Луганські області); Запоріжжя (Дніпровщина) (Дніпропетровська та Запорізька області); Одещина; Центральне Причорномор'я (Чорноморська низина) (Миколаївська, Херсонська області); Крим. Саме за цими історико-географічними землями і був розрахований їх природно-ресурсний потенціал (див. табл. 1-3).

Новизна. Вперше розраховано природно-ресурсний потенціал українських етнічних (історико-географічних) земель, визначена його компонентна структура, оцінена його територіальна та економічна продуктивність.

Виклад основного матеріалу. Подана в табл. 1 інформація характеризує величину і компонентну структуру ПРП історико-географічних земель України. Як видно з наведених даних, до першої п'ятірки за величиною ПРП входять Донеччина (понад 1/5 від усього потенціалу природних ресурсів України), Запоріжжя (Дніпровщина) (майже 15%), Київська земля (Правобережна Україна) (10%), Центрально-Лівобережна Україна (близько 9,9%) та Поділля (9,2%). На цих землях зосереджується 2/3 усіх природних багатств держави. Найменший ПРП характеризує такі землі (у порядку спадання величини потенціалу): Галичина (8,1% від показника по Україні), Крим (5,9%), Центральне Причорномор'я

Таблиця 1

**Величина та компонентна структура природно-ресурсного потенціалу
українських етнічних (історико-географічних) земель**

Історико-географічні землі	Величина ПРП, млрд. грн.	Компонентна структура ПРП, %					
		міне- ральні	водні	земельні	лісові	фауніс- тичні	природні рекреа- ційні
1. Закарпаття	34,360	3,0	31,5	19,4	17,4	0,1	28,6
2. Галичина	113,510	12,8	23,3	39,7	11,2	0,2	12,8
3. Волинь	48,188	3,0	17,2	55,1	16,2	0,6	7,9
4. Буковина (Чернівецька область)	17,878	6,5	15,1	50,8	11,6	0,1	15,9
5. Поділля	128,084	3,6	12,8	71,1	6,5	0,5	5,5
6. Київська земля (Правобережна Україна)	139,840	6,5	12,3	65,2	4,1	0,7	11,2
7. Центральна-Лівобережна Україна	137,468	9,0	13,0	64,0	5,6	1,1	7,3
8. Харківщина (Слобожанщина)	59,888	14,2	11,4	54,6	3,9	0,6	15,3
9. Донеччина	293,360	73,1	5,7	15,6	0,6	0,2	4,8
10. Запоріжжя (Дніпровщина)	206,618	56,1	8,8	28,8	0,4	0,4	5,5
11. Одещина	51,800	1,8	11,1	71,8	1,3	0,5	13,5
12. Центральне Причорномор'я (Чорноморська низина)	81,609	2,2	23,0	66,9	0,7	1,1	6,1
13. Крим	82,940	10,0	19,3	39,0	1,8	0,3	29,6
УКРАЇНА	1395,543	28,3	13,1	44,4	4,2	0,5	9,5

(Чорноморська низина) (5,8%), Харківщина (Слобожанщина) (4,3%), Одещина (3,7%), Волинь (3,5 %), Закарпаття (2,5%), Буковина (Чернівецька область) (1,3%). Відмінності у величині ПРП між крайніми землями – Донеччиною і Буковиною перевищують 16 разів.

Надзвичайно своєрідними є територіальні поєднання природних ресурсів у межах земель, що відображаються компонентною структурою їх ПРП. Так, на Донеччині сформувався потужний мінерально-земельно-водний природно-ресурсний комплекс, він же характерний і для Запоріжжя (Дніпровщини). Для Київської землі (Правобережної України) визначальним є земельно-водно-рекреаційний комплекс, як і для Волині, Галичини та Центрального Причорномор'я (Чорноморської низини). Лише для Закарпаття притаманне водно-рекреаційно-земельне територіальне поєднання природних ресурсів. Спорідненим земельно-рекреаційно-водним природно-ресурсним комплексом відзначаються Харківщина (Слобожанщина), Буковина, Одещина та Крим. На Поділлі визначальними є земельні, водні та лісові ресурси, у Центрально-Лівобережній Україні – земельні, водні та мінеральні.

Зрозуміло, що поряд з абсолютною величиною ПРП історико-географічних земель, не менш важливою для наукового аналізу і синтезу є його територіальна продуктивність, тобто обсяг потенціалу на одиницю площі. У табл. 2 територіальна продуктивність ПРП українських етнічних земель подається у балах за розімкненою шкалою, коли середній показник продуктивності по Україні приймається за 100 балів.

Аналізуючи дані табл. 2, бачимо, що відмінності між історико-географічними землями за територіальною продуктивністю інтегрального (сумарного) ПРП є значно згладженими (вирівняними) і складають 4,6 рази (між Донеччиною та Волинню як крайніми найконтрастнішими регіонами). У той же час максимальні і мінімальні

показники територіальної продуктивності за мінеральним потенціалом між Донеччиною та Одещиною відрізняються вже у 155 разів. Водний потенціал на одиницю площі у Закарпатті у 4,9 рази є більшим ніж на Одещині, де він найменший в Україні. Територіальна продуктивність земельного потенціалу Київської землі (Правобережна Україна) лише в 1,9 рази є вищою Донеччини. Відмінності за лісовим потенціалом між Галичиною та Центральним Причорномор'ям (Чорноморською низиною) у той же час є досить значними – 22,3 рази. Контрастність між землями за територіальною продуктивністю фауністичного потенціалу є вже значно меншою – 8,3 рази (Центрально-Лівобережна Україна та Буковина). Нарешті, природно-рекреаційний потенціал в Україні територіально найефективніший у Криму (409 балів), що майже вдвісьтеро перевищує відповідний показник по Поділлю (41 бал).

Якщо абсолютну величину ПРП історико-географічних земель розрахувати на загальну чисельність їх населення, – отримаємо такий важливий показник як економічна продуктивність потенціалу природних ресурсів. У табл. 3 економічна продуктивність ПРП земель подана у балах за розімкнутою шка-

Таблиця 2

**Територіальна продуктивність природно-ресурсного потенціалу
українських етнічних (історико-географічних) земель**

Історико-географічні землі	Територіальна продуктивність природно-ресурсного потенціалу (у балах за розімкнутою шкалою, середній показник по Україні – 100 балів)						
	мінераль- ного	водного	земель- ного	лісо- вого	фауніс- тичного	природно- рекреацій- ного	інтеграль- ного
1. Закарпаття	13	279	98	138	20	345	116
2. Галичина	45	176	89	267	33	132	99
3. Волинь	6	68	64	201	63	42	52
4. Буковина (Чернівецька область)	22	110	109	264	19	160	95
5. Поділля	9	71	115	112	76	41	72
6. Київська земля (Правобережна Україна)	19	76	119	79	113	95	81
7. Центральнo-Лівобережна Україна	22	66	101	94	157	53	70
8. Харківщина (Слобожанщина)	41	72	92	97	100	131	82
9. Донеччина	618	103	84	35	76	120	239
10. Запоріжжя (Дніпровщина)	300	102	98	15	139	85	151
11. Одещина	4	57	97	52	60	91	68
12. Центральне Причорномор'я (Чорноморська низина)	5	117	100	12	151	42	66
13. Крим	47	196	117	78	80	409	133
УКРАЇНА	100	100	100	100	100	100	100

лою, коли відповідний середній показник по Україні загалом приймається за 100 балів. Економічна продуктивність ПРП фактично розкриває рівень забезпеченості населення історико-географічних земель потенціалом природних ресурсів. Отже мінеральними ресурсами найбільш забезпечене населення Донеччини, а найменше – Одещина (різниця – у 72,6 раза). Потенціал водних ресурсів на душу населення найвищим є на Закарпатті, що в 4,1 рази перевищує рівень Харківщини (Слобожанщини). Економічна продуктивність земельного потенціалу Центрального Причорномор'я (Чорноморської низини) в 3,5 рази є більшою ніж на Донеччині, де вона має найменші показники в Україні. Закарпаття є еталоном у забезпеченості населення потенціалом лісових ресурсів в Україні, з протилежного боку – Запоріжжя (Дніпровщина). Крайніми за економічною продуктивністю фауністичного потенціалу є Центральне Причорномор'я та Буковина (Чернівецька область) (мінімальний показник по Україні). 394 бали – рівень забезпеченості населення Криму природно-рекреаційним потенціалом. Це в 7 разів більше ніж на Поділлі. Нарешті, лідерами в Україні за економічною продуктивністю сумарного (інтегрального) ПРП є такі історико-географічні землі, як: Донеччина – 140 балів, Запоріжжя (Дніпровщина) – 130 балів, Крим – 128 балів, Центральнo-Лівобережна Україна – 117 балів; з протилежного боку – Харківщина (Слобожанщина) – 70 балів, Київська земля (Правобережна Україна) –

67 балів та Буковина (Чернівецька область) – 65 балів. Звісно, чисельність населення історико-географічних земель істотно впливає на економічну продуктивність їх ПРП.

Висновки. Природно-ресурсний потенціал є однією з найважливіших складових, що характеризує усеагальні продуктивні сили українських етнічних (історико-географічних) земель. За величиною ПРП до першої п'ятірки входять Донеччина, Запоріжжя (Дніпровщина), Київська земля (Правобережна Україна), Центральнo-Лівобережна Україна та Поділля, що зосереджують 2/3 усіх природних багатств держави. Найменший ПРП концентрують (у порядку спадання величини потенціалу): Харківщина (Слобожанщина), Одещина, Волинь, Закарпаття та Буковина (Чернівецька область) (сумарно 15,2%).

Найтипівішими для історико-географічних земель України є: мінерально-земельно-водний природно-ресурсний комплекс (Донеччина та Запоріжжя) (Дніпровщина), земельно-водно-рекреаційний (Київська земля (Правобережна Україна), Волинь, Галичина, Центральне Причорномор'я (Чорноморська низина)), земельно-рекреаційно-водний комплекс (Харківщина (Слобожанщина), Буковина, Одещина та Крим).

За територіальною продуктивністю ПРП, розрахованою як обсяг потенціалу на одиницю площі у порівнянні з показником по Україні, прийнятим за 100 балів, серед земель першими є Донеччина (239

Таблиця 3

**Економічна продуктивність природно-ресурсного потенціалу
українських етнічних (історико-географічних) земель**

Історико-географічні землі	Економічна продуктивність природно-ресурсного потенціалу (у балах за розімкнутою шкалою, середній показник по Україні – 100 балів)						
	мінераль- ного	водного	земель- ного	лісо- вого	фауніс- тичного	природно- рекреа- ційного	інтеграль- ного
1. Закарпаття	11	252	51	439	20	310	104
2. Галичина	34	132	66	200	25	99	74
3. Волинь	8	96	90	282	89	59	73
4. Буковина (Чернівецька область)	15	75	75	181	13	110	65
5. Поділля	12	96	156	152	103	56	98
6. Київська земля (Правобережна Україна)	16	63	99	65	94	79	67
7. Центральна-Лівобережна Україна	37	117	169	158	262	89	117
8. Харківщина (Слобожанщина)	35	61	96	61	100	111	70
9. Донеччина	363	61	50	21	45	70	140
10. Запоріжжя (Дніпровщина)	259	88	85	13	120	73	130
11. Одещина	5	62	132	23	80	102	73
12. Центральне Причорномор'я (Чорноморська низина)	9	204	175	20	263	74	116
13. Крим	46	190	127	55	80	394	128
УКРАЇНА	100	100	100	100	100	100	100

балів), Запоріжжя (Дніпровщина) (151 бал) та Крим (133 бали), з протилежного боку – Одещина (68 балів), Центральне Причорномор'я (Чорноморська низина) (66 балів) та Волинь (52 бали).

Економічна продуктивність ПРП найвища серед історико-географічних земель України на

Донеччині (140 балів), Запоріжжі (Дніпровщині) (130 балів) та в Криму (128 балів), значно нижчими є її показники на Харківщині (Слобожанщині) (70 балів), Київській землі (Правобережна Україна) (67 балів) та на Буковині (Чернівецька область) (65 балів).

Література

1. Заставний Ф.Д. Україна: природа, населення, економіка. Львів: Апірі. 2011. 504 с.
2. Грушевський М. Новий поділ України. Народна воля. 1917. 23 (10). 12. С. 62-66.
3. Рудницький С.Л. Чому ми хочемо самостійної України. Львів : Світ. 1994. 416 с.
4. Кубійович В. Географія українських і сумежних земель. 2-ге вид. Краків; Львів: Укр. вид-во. 1943. 520 с. карти 5л.
5. Дністрянський М., Дністрянська Н. Етногеографічне макрорайонування України як інформаційна основа регіональної економіки. Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету ім. В. Гнатюка. Серія: географія. 2023. № 1 (випуск 54). С. 50-57. URL: <http://dspace.tnpu.edu.ua/handle/123456789/29913>
6. Верменич Я.В. Історико-географічний регіон. Енциклопедія історії України: Т.3: Е-Й / Редкол.: В.А. Смолій (голова) та ін. НАН України. Інститут історії України. К.: В-во «Наукова думка». 2005. С. 549-551. URL: http://www.history.org.ua/?termin=Istoryko_geograf_region
7. Косміна О.Ю. Етнографічні регіони України Енциклопедія історії України. Т.3: Е-Й / Редкол.: В.А. Смолій (голова) та ін. НАН України. Інститут історії України. К.: В-во «Наукова думка». 2005. С. 62-64. URL: http://www.history.org.ua/?termin=Etnografichni_regiony_Ukrainy
8. 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 доміанти : 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.
9. Байцар А.Л. Україна та українці на європейських етнографічних картах. Монографія. Львів: ЗУКЦ. 2022. 328 с. URL: https://geography.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2022/01/Baytsar-UKRAYINA-ta-ukraintsi-na-kartakh_book2021.pdf
10. Чмирьова Л.Ю., Федей Н.О. Районування території України як один з факторів просторового соціально-економічного розвитку регіонів. Ефективна економіка. 2013. № 3. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=1878>

Дата першого надходження статті до видання: 10.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

USING SUNFLOWER HUSKS FOR THE REMEDIATION OF OIL-CONTAMINATED SOILS

Shevchyk-Kostiuk L.Z.¹, Romaniuk O.I.¹, Romaniuk H.V.¹, Boretska I.Yu.²

¹ L.M. Lytvynenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry
of National Academy of Sciences of Ukraine
Naukova Str., 3A, 79060, Lviv

² Ivan Franko National University of Lviv
Universytetska St., 1, 79000, Lviv
lesyashevchik@gmail.com

Oil contamination is a global environmental problem due to its serious consequences for the environment and humans. Crude oil and petroleum products negatively affect the morphological, physicochemical, and biological properties of the soil, leading to the withdrawal of large areas of land from agricultural use as a result of reduced or complete loss of their productivity.

To improve the properties of oil-contaminated soils, localize the contaminants, and stimulate natural remediation processes, it is advisable to use various sorbents ameliorants – materials capable of absorbing large amounts of petroleum products, thereby preventing their further migration. At the same time, these materials improve soil properties by loosening it, optimizing gas exchange, acting as a source of important microelements, a matrix for the growth of oil-degrading microorganisms, etc.

The article investigates the sorption capacity of sunflower husks – an oil production waste – for oil and water and justifies the possibility of their use for the remediation of oil-contaminated soils. The physicochemical properties of sunflower husks were determined, and its positive effect on the water and air regimes of the soil is shown. The water absorption capacity of sunflower husks was 0.97 g/g, oil absorption was 0.78 g/g, and the sorption capacity for oil emulsion ranged from 1.19 to 1.26 g/g, depending on the oil content in emulsion. Due to the ability of sunflower husks to retain moisture and air within their structure, its use improves the water permeability and aeration of oil-contaminated soil, preventing it from drying out or waterlogging, reducing soil bulk density, and increasing soil porosity. The influence of sunflower husks on enhancing the efficiency of phytoremediation of oil-contaminated soils (5 wt.% oil in soil) using plants: *Secale cereal*, *Avena sativa*, *Sorghum saccharatum*, *Panicum virgatum*, *Zea mays*, *Linum usitatissimum* and *Melilotus officinalis* was investigated. It is shown that the addition of sunflower husks creates favorable conditions for plant growth and development, as evidenced by increased morphometric parameters and biomass accumulation. The obtained results show that addition of sunflower husks into oil-contaminated soil localizes oil pollution, loosens the soil, increases moisture retention capacity, reduces toxicity, thereby creating optimal conditions for the life of plants and microorganisms. Being an inexpensive, easily accessible, and environmentally friendly organic material, sunflower husks can be used in technologies for the remediation of oil-contaminated soils. **Key words:** sunflower husks, oil-contaminated soils, oil sorption, phytoremediation.

Використання лушпиння соняшника для відновлення нафтозабруднених ґрунтів. Шевчик-Костюк Л.З., Романюк О.І., Романюк Г.В., Борецька І.Ю.

Забруднення нафтою є глобальною екологічною проблемою через серйозні наслідки для довкілля та людини. Нафта та нафтопродукти негативно впливають на морфологічні, фізико-хімічні і біологічні властивості ґрунту, призводячи до виведення великої кількості земель з сільськогосподарського вжитку через зниження або повну втрату їх продуктивності.

Для покращення властивостей нафтозабрудненого ґрунту, локалізації забруднювача, активізації процесів природного відновлення доцільно використовувати різноманітні сорбенти-меліоранти – матеріали, які здатні вбирати у великих кількостях нафтопродукти, тим самим запобігаючи їх подальшій міграції, та одночасно покращувати властивості ґрунту, розпушуючи його, оптимізуючи газообмін, виступаючи джерелом важливих мікроелементів, матрицею для зростання мікроорганізмів-деструкторів нафти та ін.

У статті досліджено сорбційну здатність лушпиння соняшника – відходів олійного виробництва – щодо нафти та води і обґрунтовано можливість його використання для відновлення нафтозабруднених ґрунтів. Визначено фізико-хімічні властивості лушпиння соняшника і показано його позитивний вплив на водний та повітряний режими ґрунту. Водопоглинання лушпиння становить 0,97 г/г, нафтопоглинання – 0,78 г/г, сорбційна ємність по нафтовій емульсії становить 1,19-1,26 г/г, в залежності від вмісту нафти в емульсії. Завдяки здатності лушпиння соняшника утримувати вологу та повітря (в об'ємі), його використання покращує водопроникність та аерацію нафтозабрудненого ґрунту, запобігаючи його пересушуванню чи перезволоженню, зменшуючи щільність та збільшуючи пористість ґрунту. Досліджено вплив лушпиння соняшника на підвищення ефективності фітореMediaції ґрунтів, забруднених нафтою (5% нафти у ґрунті) за участі рослин: жита посівного (*Secale cereale*), вівса посівного (*Avena sativa*), сорго цукрового (*Sorghum saccharatum*), проса лозоподібного (*Panicum virgatum*), кукурудзи звичайної (*Zea mays*), льону звичайного (*Linum usitatissimum*), буркуну лікарського (*Melilotus officinalis*). Показано, що додавання лушпиння соняшника у нафтозабруднений ґрунт створює сприятливі умови для росту та розвитку рослин, що проявляється у зростанні їхніх морфо-фізіологічних параметрів та накопиченню біомаси. Отримані результати свідчать, що внесення лушпиння соняшника у нафтозабруднений ґрунт локалізує нафтове забруднення, розпушує ґрунт, підвищує вологоутримувальну здатність, зменшує токсичність, чим створює оптимальні умови для росту рослин та біодеградації нафти у ґрунті. Будучи недорогим, легкодоступним і екологічно безпечним органічним матеріалом, лушпиння соняшника може використовуватись у технологіях відновлення нафтозабруднених ґрунтів. **Ключові слова:** лушпиння соняшника, нафтозабруднений ґрунт, сорбція нафти, фітореMediaція.



Problem statement. The main environmental problem in regions with a developed oil and gas industry is the contamination of environmental components with oil and petroleum products. Accidental spills of oil and petroleum products occur during the extraction, transportation, processing, storage, consumption and disposal of products, and cause significant damage to ecosystems, up to environmental disasters, and lead to negative economic and social consequences. Oil is a complex mixture of organic substances consisting of a large amount of hydrocarbons (n-alkanes, polycyclic aromatic hydrocarbons, etc.), a small amount of non-hydrocarbon compounds (sulfides, nitrides, alkanolic acids, etc.), organic compounds of metals (vanadium, nickel, etc.), and microelements [1, 2]. When entering the soil, oil causes significant negative and sometimes irreversible changes: viscosity and density of the soil mass increase, content of heavy metals and carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons, resins, and asphaltene increases, porosity, water permeability and moisture capacity of the soil decrease, nitrification capacity and activity of soil enzymes decrease, number and diversity of soil microorganisms decrease, the redox potential, carbon-nitrogen balance change [3]. These changes inhibit the growth and development of plants, lead to soil degradation and the withdrawal of such territories from agricultural use. Oil and petroleum products bind to soil components and decompose slowly and with difficulty, creating conditions for secondary contamination of atmospheric air, surface water and groundwater.

Relevance of the research. Today, many methods for the remediation of oil-contaminated soils have been developed. Phytoremediation is considered the most environmentally friendly approach. Research is being conducted to increase the efficiency of oil components biodegradation of in the process of phytoremediation and additional physicochemical extraction with the participation of remediation agents, in particular sorbents – substances capable of absorbing large quantities of oil products, thereby preventing their further migration. In addition, most sorbents function as soil amendments – they improve soil properties, loosen the soil structure, optimize gas exchange, act as a source of essential microelements, a matrix for the growth of hydrocarbon-degrading microorganisms, etc. Porous materials are mainly used as sorbents, including peat, ash, coke, silica gels, aluminogels, as well as various industrial and agricultural wastes: oilseed meal, sawdust, husks, bran, straw [4, 5].

Natural sorbents attract special attention due to their wide distribution in nature, low cost and ease of use. The combination of these advantages with rather high sorption properties makes them promising raw materials for soil remediation from pollution [5-8].

Analysis of research and publications. Sunflower is an important agricultural crop, the cultivated area of which has been increasing annually. During sunflower oil production, significant amounts of a by-product are

formed – sunflower husk – a hard, woody, multilayered formation, homogeneous in physical structure, with a stable chemical composition and physical and mechanical properties. Sunflower husk consists mainly of cellulose, lignin, hemicellulose and contains small amounts of proteins, fats and minerals [9]. It has high porosity, organic composition, and the ability to retain moisture, which makes it promising in terms of soil purification. However, information on the use of sunflower husk for the remediation of contaminated soils is poorly researched. Only the effect of sunflower husks combined with bird droppings for the decomposition of petroleum hydrocarbons in soil [10], the use of husks with immobilized microorganisms [11], and the application of modified sunflower husk-derived biochar as a sorbent for petroleum product removal [12] are reported. However, there is no information on the use of untreated sunflower husks (sunflower oil production waste) in phytoremediation technologies for the remediation of oil-contaminated soils.

The aim of the study was to establish the sorption capacity of sunflower husks for oil and water and its suitability for the remediation of oil-contaminated soils, in particular for enhancing the efficiency of phytoremediation.

Materials and Methods. Sunflower husks, a by-product of oil production, were used for the study. Bulk density was determined by weighing the husks in a measuring cup. The moisture content of the husk was determined by the gravimetric method – by drying the samples to constant mass in a drying oven at a temperature of 105 °C.

To determine water absorption capacity, 10 g of sunflower husks were soaked in water for 20 days at a temperature of 20 °C, until completely saturated with water. After saturation, the husks were removed from the water, shaken on a sieve, repeatedly blotted with filter paper, and weighed. Water absorption capacity was determined as the ratio of the mass of absorbed water to the mass of sorbent.

To determine the sorption capacity of sunflower husks for oil / oil emulsion (oil absorption capacity), similar actions were performed with the participation of husks and oil / oil emulsion. The oil emulsion was prepared by mixing water and crude oil to obtain oil contents of 2.5 wt.%, 5 wt.%, 10 wt.%. The husks were soaked in oil / oil emulsion for 20 days at a temperature of 20 °C. The experiments were conducted using oil from the Borislav oil field, with a density of 0.826 g/ml.

To investigate the effect of sunflower husks on enhancing the efficiency of phytoremediation of oil-contaminated soils, soil was artificially contaminated with oil at a concentration of 5%, sunflower husks were added, and the soil was planted with seeds of rye (*Secale cereale*), oat (*Avena sativa*), sugar sorghum (*Sorghum saccharatum*), switchgrass (*Panicum virgatum*), corn (*Zea mays*), flax (*Linum usitatissimum*), and sweet clover (*Melilotus officinalis*).

Morphometric parameters of plants were measured on the 45th day of the experiment using generally

accepted methods [13]. The content of photosynthetic pigments in plant leaves was determined spectrophotometrically [14]. Soil phytotoxicity was assessed using plant test objects: *Linum usitatissimum* L., *Helianthus annuus* L., *Fagopyrum vulgare* St. [15]. The bulk density of undisturbed soil was determined using the cutting ring method [16]. The particle density of the soil was determined by the pycnometric method [17]. Based on the data obtained, the soil porosity was calculated.

All experiments were performed at least three times. The results of the studies were statistically processed using Microsoft Excel.

Results and Discussion. The extent of oil degradation in soil depends on many factors. The efficiency of biodegradation of contaminants and the rate of soil remediation are influenced by oxygen availability, moisture content, temperature, nutrient content, soil structure and aeration. Unprocessed sunflower husks, when applied to the soil, can act as a natural structure-forming agent and improver of physical properties.

Some physicochemical properties of sunflower husks were determined. It was found that sunflower husks have a size of 9×5 mm, moisture content ranges from 9 to 10 %, and bulk density is 0.12 g/cm³ (Table 1). The geometric shape of a sunflower husk is an elongated hemisphere, the volume of which contains air (Fig. 1). Due to its geometric shape and fairly dense structure, the husk creates additional pore space in oil-contaminated soil, increasing

the porosity of the contaminated soil and preventing soil particles from sticking together. This creates favorable conditions for improving the water and air regimes of the soil, which are important for plants, aerobic oil-degrading microorganisms, and other living organisms.

Under natural conditions, when oil enters the soil environment, it mixes with water, forming oil emulsions that penetrate the pores of the soil covering its particles with a hydrophobic film. The hydrophobicity of oil-contaminated soils makes them overmoistened or overdried, and the sticking together of soil particles leads to its re-compaction. Sunflower husk is able to retain a certain amount of sorbed moisture and air (by volume), thereby regulating the water-air regime of the soil, preventing overdrying or overmoistening, and improving water permeability and aeration (Fig. 1). It was established that the water absorption capacity of the husk is 0.97 g/g, oil absorption capacity is 0.78 g/g, and the sorption capacity of sunflower husks for oil emulsion is 1.19-1.26 g/g, depending on the oil content in the emulsion. It is worth noting that the sorption capacity of sunflower husks for oil emulsion is higher than the sorption capacity for oil and water (Table 1). This can be explained by the fact that oil emulsion has a lower viscosity than pure oil. When the husk comes into contact with the emulsion, water penetrates the pores, causing the husk to swell, thereby increasing the sorption surface area and facilitating the access of oil droplets to the internal pores. That is, water

Table 1

Physicochemical properties of sunflower husk

Parameter	Value
Husk length, mm	9±1
Width, mm	5±1
Humidity, %	9,81±0,04
Bulk density, g/cm ³	0,12±0,02
Water capacity, g/g	0,97 ±0,03
Oil capacity, g/g	0,78±0,02
Sorption capacity for oil emulsion, g/g	
2.5 % oil in emulsion	1,26 ±0,02
5 % oil in emulsion	1,24±0,02
10 % oil in emulsion	1,19±0,01

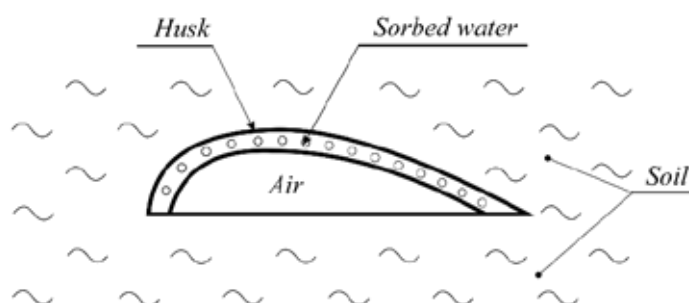


Fig. 1. Sunflower husk in moist soil

acts as a transporter that promotes deeper penetration of oil particles into the structure of the sorbent. In addition, the sunflower husk has both hydrophobic (in lignin) and hydrophilic areas (in cellulose and hemicellulose), and therefore is able to simultaneously retain both phases of the emulsion: the aqueous phase through hydrogen bonds, the oil phase through hydrophobic interactions, which increases the overall sorption capacity.

The data obtained show that sunflower husks are able to localize oil pollution and improve the properties of contaminated soil, thereby intensifying the processes of oil biodegradation by creating optimal conditions for the life of plants and microorganisms. Adding sunflower husks to oil-contaminated soil reduces its bulk density and increases total porosity (Table 2).

To confirm the above, we investigated the effect of sunflower husks on enhancing the efficiency of phytoremediation of oil-contaminated soils (5 wt.% oil) using plants: *S. cereale*, *A. sativa*, *S. saccharatum*, *P. virgatum*, *Z. mays*, *L. usitatissimum*, *M. officinalis*.

The different level of resistance of the studied plants to oil exposure were observed, as well as a variable effect of sunflower husks on plant growth in oil-contaminated soil (Fig. 2).

Corn is relatively resistant to oil contamination, and the addition of sunflower husks to contaminated

soil does not stimulate its growth parameters. For corn and flax, a decrease in root length of 19.7 and 3.6 %, respectively, was observed compared to oil-contaminated soil without husks. In the variant with sowing oats, a positive effect of sunflower husks on root length and shoot height was observed. The best results were obtained for switchgrass, sorghum, rye and sweet clover. For switchgrass and sorghum, relative shoot height was 28.11 and 35.95 % higher, respectively, compared to the shoot height of plants grown in oil-contaminated soil without husks, and also 19.83 and 16.07 % higher than the shoot height of plants grown in soil two years after oil contamination. Adding sunflower husks to oil-contaminated soil increased the resistance of sweet clover to oil contamination and enhanced its growth parameters. The relative root length and relative shoot height of sweet clover plants grown in oil-contaminated soil with the addition of sunflower husks were 5.26 and 10.02 % higher, respectively, than those of plants grown in oil-contaminated soil two years after contamination (Fig. 2, Fig. 4).

Adding sunflower husks to oil-contaminated soil resulted in increased biomass of phytoremediation plants, as indicated by higher fresh and dry plant mass compared to plants grown in oil-contaminated soil without sunflower husks (Fig. 3).

Table 2

Bulk density and total porosity of oil-contaminated soil

Options	Bulk density, g/cm ³	Total porosity, %	Moisture content, %
Control	1,23	46,2	24,1
Oil-contaminated soil (5% oil in soil)	1,34	38,5	26,3
Oil-contaminated soil (5% oil in soil)+sunflower husks	1,11	49,28	26,4

Note: Control – uncontaminated soil without oil and without sunflower husks

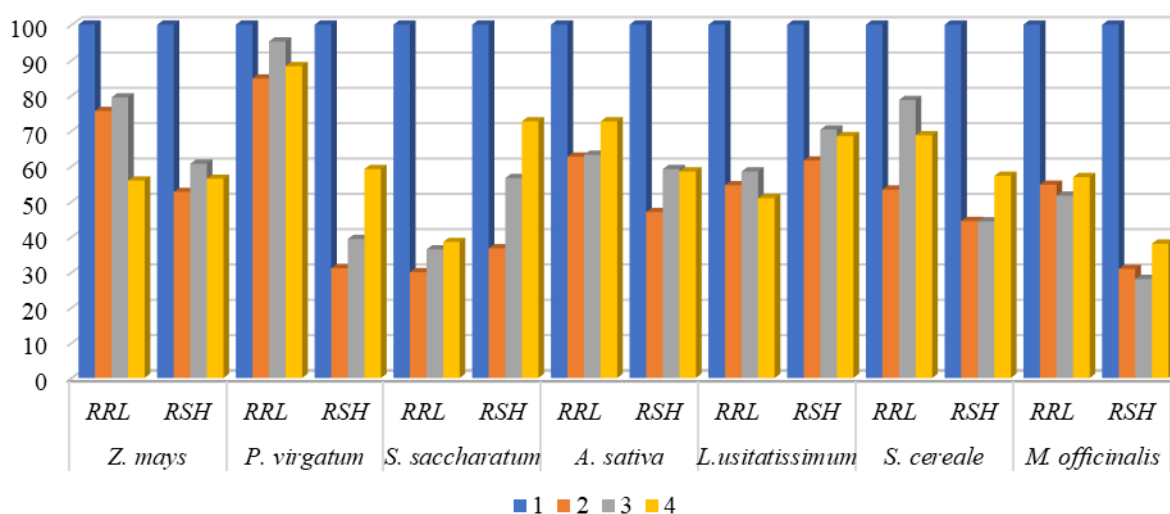


Fig. 2. Relative root length (RRL) and relative shoot height (RSH) of phytoremediation plants when grown in oil-contaminated soil: 1 – control; 2 – oil-contaminated soil (5 %, fresh contamination); 3 – oil-contaminated soil (5 %, two years after contamination), 4 – oil-contaminated soil (5 %) + sunflower husks

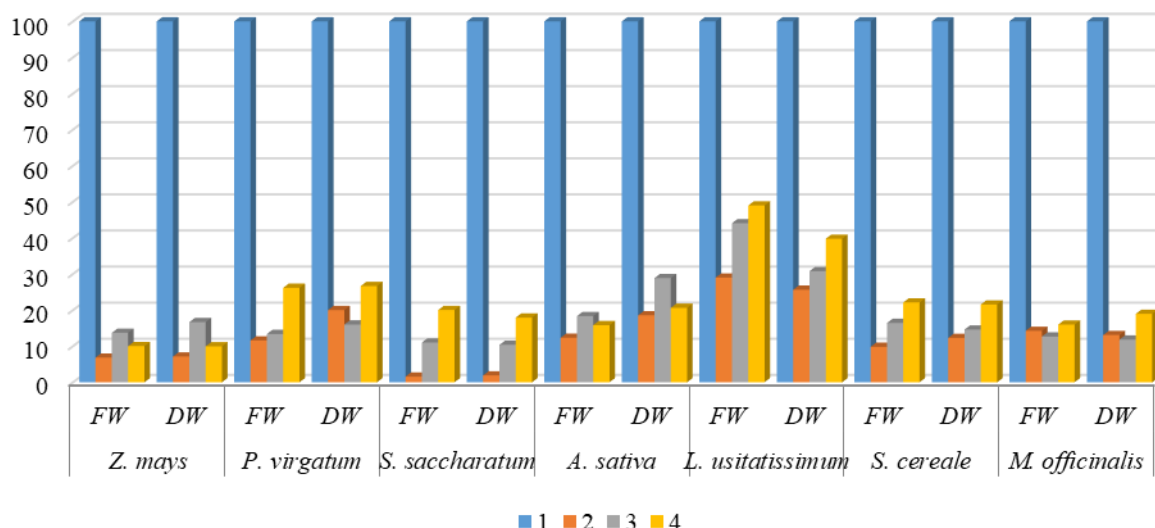


Fig. 3. Relative fresh weight (FW) and relative dry weight (DW) of phytoremediation plants grown in oil-contaminated soil: 1 – control; 2 – oil-contaminated soil (5 %, fresh contamination); 3 – oil-contaminated soil (5 %, two years after contamination), 4 – oil-contaminated soil (5 %) + sunflower husks



Fig. 4. Plants of *M. officinalis* (A) and *P. virgatum* (B) grown in oil-contaminated soil: 1 – control; 2 – oil-contaminated soil (5 %, fresh contamination); 3 – oil-contaminated soil (5 %, two years after contamination), 4 – oil-contaminated soil (5 %) + sunflower husks

The indirect effect of oil contamination on plants, caused by changes in the physicochemical properties of the soil, leads to disturbances in root nutrition and, consequently, to the inhibition of photosynthetic activity. This inhibition is associated with the alteration in the content of photosynthetic pigment, primarily chlorophylls and carotenoids. Under conditions of oil contamination, the content of chlorophylls *a* and *b* and carotenoids decreases compared to the control. Adding sunflower husks to oil-contaminated soil increases plant resistance to stress. The content of chlorophyll *a* and *b* and carotenoids in the leaves of sweet clover and switchgrass grown in oil-contaminated soil with the addition of sunflower husks were higher than those in plants grown in oil-contaminated soil without sunflower husks (Table 3).

The phytotoxicity of soils after phytoremediation with and without the addition of sunflower husks was determined using value of effective toxicity. Sweet clover plants were found to have a positive effect on oil-contaminated soil, resulting in a reduction of soil phytotoxicity when applied alone. However, an even greater decrease in phytotoxicity of oil-contaminated

soil was observed when sunflower husks were used in the phytoremediation (Table 4).

Therefore, sunflower husks enhance the phytoremediation of oil-contaminated soils by improving soil properties, including soil structure, moisture retention, reducing soil toxicity, and by creating optimal conditions for oil rhizodegradation. Being inexpensive, readily available, and environmentally friendly, sunflower husks can be used to remediation of oil-contaminated soils.

Conclusions. The sorption capacity of oil production waste, sunflower husks, was determined, and their potential application for the remediation of oil-contaminated soils was demonstrated. The water absorption capacity of sunflower husks was 0.97 g/g, oil absorption was 0.78 g/g, and the sorption capacity for oil emulsion ranged from 1.19 to 1.26 g/g, depending on the oil content in emulsion. Due to their ability to retain moisture and air within their structure, sunflower husks contribute to improving the physico-chemical properties of contaminated soil, thereby intensifying oil biodegradation processes. Sunflower husks are a natural, environmentally safe and economically viable sorption

Table 3

Content of photosynthetic pigments in the leaves of *M. officinalis* and *P. virgatum* grown in oil-contaminated soil

Options	Pigment content, µg/g			
	Chlorophyll <i>a</i>	Chlorophyll <i>b</i>	Chlorophyll <i>a+b</i>	Carotenoids
<i>M. officinalis</i>				
Control	2,331	1,375	3,705	0,540
Oil-contaminated soil (5 %, fresh contamination)	1,32	1,06	2,38	0,429
Oil-contaminated soil (5 %, two years after contamination)	1,43	0,975	2,405	0,484
Oil-contaminated soil (5 %) + sunflower husks	1,762	0,942	2,662	0,458
<i>P. virgatum</i>				
Control	0,549	0,236	0,785	0,107
Oil-contaminated soil (5 %, fresh contamination)	0,248	0,156	0,404	0,057
Oil-contaminated soil (5 %, two years after contamination)	0,226	0,100	0,325	0,051
Oil-contaminated soil (5 %) + sunflower husks	0,344	0,188	0,533	0,062

Table 4

Effect of *M. officinalis* on phytotoxicity of oil-contaminated soil

Test objects	Phytotoxicity		
	Oil-contaminated soil (5 %)	Oil-contaminated soil (5 %, two years after contamination)	Oil-contaminated soil (5 %) + sunflower husks
<i>L. usitatissimum</i>	0,523	0,210	0,270
<i>H. annuus</i>	1,403	0,480	0,610
<i>F. vulgare</i>	0,918	0,914	0,666

material and soil-structuring agent. Their inclusion in phytoremediation schemes improves the condition of plants and, consequently, the microbiological activity

of the soil, and thus they can be used to remediation of oil-contaminated soils and for enhancing the efficiency of phytoremediation.

References

1. Li J., Xu Y., Song Q., Yang J., Xie L., Yu Sh., Zheng L. Polycyclic aromatic hydrocarbon and *n*-alkane pollution characteristics and structural and functional perturbations to the microbial community: a case-study of historically petroleum-contaminated soil. *Environ Sci Pollut Res*. 2021. Vol. 28. P. 10589–10602. DOI:10.1007/s11356-020-11301-1
2. Wang S., Wang D., Yu Z., Dong X., Liu S., Cui H., Sun B. Advances in research on petroleum biodegradability in soil. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2021. Vol. 23. P. 9-27. DOI:10.1039/D0EM00370K
3. Li Y., Li C., Xin Y., Huang T., Liu J. Petroleum pollution affects soil chemistry and reshapes the diversity and networks of microbial communities *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2022. Vol. 246. P. 114129 DOI:10.1016/j.ecoenv.2022.114129.
4. Глібовицька Н. І., Плаксії Л. В. Ефективність поглинання нафти сорбентами природного та штучного походження. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2019. т. 29, № 6. С. 76-78. DOI:10.15421/40290615.
5. Mojzis M., Bubenikova T., Zachar M., Kacikova D., Stefkova J. Comparison of natural and synthetic sorbents efficiency at oil spill removal. *BioResources*. 2019. Vol. 14(4). P. 8738-8752. DOI:10.15376/biores.14.4.8738-8752
6. Znak Z., Mnykh R., Pyrig M. A., Zhuk T. V. Research of oil sorption by natural clinoptylolite. *Chemistry, Technology and Application of Substances*, 2022. Vol. 5(2). P. 58-64. DOI:10.23939/ctas2022.02.058.
7. Kalivoshko O., Romaniuk W., Kalivoshko M. Technical and economic justification of efficiency of carbon sorbents based on pine sawdust for removing oil products. *Machinery & Energetics*. 2022. Vol. 13. № 1. P. 49-53. DOI:10.31548/machenergy.13(1).2022.49-53
8. Калівощко О. М., Наумовська О. І., Бережнюк Є. М., Паламарчук С. П., Павлюк С. Д. Еколого-економічне обґрунтування ефективності вуглецевих сорбентів на основі тирси різних порід дерев. *Біологічні системи: теорія та інновації*. 2024. Т. 15, № 2, С. 28-40. DOI:10.31548/biologiya15(2).2024.003.
9. Gonzalez Matute R., Figlas D., Devalis R., Delmastro S., Curvetto N. Sunflower seed hulls as a main nutrient source for cultivating *Ganoderma lucidum*. *Micologia Aplicada Internacional*. 2002. Vol. 14 (2). P. 19-24. URL: <https://www.redalyc.org/pdf/685/68514202.pdf>.
10. Boopathy S., Appavoo M.S., Radhakrishnan I. Sunflower seed husk combined with poultry droppings to degrade petroleum hydrocarbons in crude oil-contaminated soil. *Environmental Engineering Research*. 2021. Vol. 26(5). P. 200361. DOI:10.4491/eer.2020.361.
11. Cubitto M. A., Gentili A. R. Bioremediation of Crude Oil-Contaminated Soil By Immobilized Bacteria on an Agroindustrial Waste – Sunflower Seed Husks. *Bioremediation Journal*. 2015. Vol. 19(4). P. 277–286. DOI:10.1080/10889868.2014.995376.
12. Klimek-Kopyra A., Sadowska U., Kubon M., Gliniak M., Sikora J. Sunflower Husk Biochar as a Key Agrotechnical Factor Enhancing Sustainable Soybean Production. *Agriculture*. 2021. Vol. 11(4). P. 305. DOI:10.3390/agriculture11040305.
13. Грицаєнко З. М., Грицаєнко А. О., Карпенко В. П. Методи біологічних та агрохімічних досліджень рослин і ґрунтів. Київ: «Нічлава», 2003. 316 с.
14. Мусієнко М. М., Паршикова Т. В., Славний П. С. Спектрофотометричні методи в практиці фізіології, біохімії та екології рослин. Київ: Фітосоціоцентр, 2001. 200 с.
15. Романюк О. І., Шевчик Л. З., Ощиповський І. В., Жак Т. В. Методика екологічного оцінювання нафтозабруднених ґрунтів. *Вісник Дніпропетровського університету. Біологія, екологія*. 2016. № 24(2). С. 264-269. DOI:10.15421/011633.
16. ДСТУ EN ISO 11272:2022. Якість ґрунту. Визначення сухої об'ємної щільності. Київ, 2022. 22 с.
17. ДСТУ 4745:2007. Якість ґрунту. Визначення щільності твердої фази пікнометричним методом. Київ, 2009. 8 с.

Дата першого надходження статті до видання: 16.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА АРХІТЕКТУРА ГРОМАДСЬКИХ БУДІВЕЛЬ ЧЕРЕЗ БІОМОРФНО-АЛГОРИТМІЧНИЙ СИНТЕЗ

Олійник Т.П., Маковецька О.О., Романюта Є.В.

Одеська державна академія будівництва та архітектури

вул. Дідріхсона, 4, 65029, м. Одеса

oleynik_himek@odaba.edu.ua, makoveckaya_himek@odaba.edu.ua,

romaniutayelyzaveta@gmail.com

У період післявоєнної відбудови України приморські зони розглядаються як стратегічний ресурс економічного зростання та розвитку інноваційних проектів, що зумовлює необхідність формування стратегій розвитку міст на засадах блакитної економіки, узгоджених із європейським курсом. Показано, що впровадження сучасних архітектурних рішень на засадах «зеленого» будівництва сприяє підвищенню екологічної стійкості прибережних територій та якості міського середовища. У статті розкрито потенціал біоморфно-алгоритмічного синтезу як одного з актуальних підходів до проектування енергоефективних громадських будівель у контексті сталого розвитку. Особливу увагу зосереджено на поєднанні принципів біомімітики, параметричного формоутворення, «зеленого» будівництва, екологічної сертифікації та інтеграції відновлюваних джерел енергії в архітектурну оболонку. На основі узагальнення сучасних наукових досліджень у галузі зеленої архітектури, цифрового проектування та BIPV-систем встановлено, що енергоефективність громадських об'єктів досягається не лише завдяки інженерним системам, але й визначається архітектурною формою, орієнтацією будівлі, характеристиками фасадної оболонки, а також взаємодією з природним освітленням і вітровим режимом ділянки. Як приклад практичної апробації такого підходу розглянуто проєкт культурного центру, розміщений у структурі прибережної зони. Показано, що для такого об'єкта біоморфна пластика оболонки може працювати одночасно як композиційний, кліматичний і енергетичний інструмент, забезпечуючи адаптацію об'єкта до складних природно-кліматичних умов приморських територій. Окрему увагу приділено ролі цифрових технологій у процесі проектування. Розглянуто застосування параметричного моделювання, алгоритмічного керування геометрією, BIM-координації, інсоляційного та енергетичного аналізу, CFD-моделювання повітряних потоків, а також оптимізації інтеграції напівпрозорих BIPV-модулів. Доведено, що поєднання біоморфної морфології, цифрових методів формоутворення та енергоефективних фасадних рішень формує перспективний напрям розвитку сучасної архітектури громадських будівель у прибережних міських середовищах. *Ключові слова:* біоморфно-алгоритмічний синтез, сталий розвиток, зелене будівництво, енергоефективність, громадські об'єкти, BIPV, цифрові технології.

Energy-efficient architecture of public buildings through biomorphic-algorithmic synthesis. Oliynyk T., Makovetska O., Romaniuta Ye.

During the post-war reconstruction of Ukraine, coastal zones are increasingly regarded as a strategic resource for economic growth and the development of innovative projects. This necessitates the formation of urban development strategies based on the principles of the blue economy and aligned with the European integration course. It is demonstrated that the implementation of contemporary architectural solutions based on green building principles contributes to enhancing the ecological resilience of coastal territories and improving the quality of the urban environment. The article reveals the potential of biomorpho-algorithmic synthesis as one of the relevant approaches to the design of energy-efficient public buildings within the context of sustainable development. Particular attention is paid to the integration of principles of biomimicry, parametric form-finding, green building practices, environmental certification, and the incorporation of renewable energy sources into the architectural envelope. Based on the synthesis of contemporary scientific research in the fields of green architecture, digital design, and Building-Integrated Photovoltaic (BIPV) systems, it is established that the energy efficiency of public buildings is determined not only by engineering systems but also by architectural form, building orientation, characteristics of the façade envelope, as well as interaction with natural daylight and the wind regime of the site. As an example of the practical application of this approach, the project of a cultural center located within a coastal zone structure is examined. It is shown that for such an object the biomorphic plasticity of the envelope can function simultaneously as a compositional, climatic, and energy-related instrument, ensuring the adaptation of the building to the complex natural and climatic conditions of coastal territories. Special attention is given to the role of digital technologies in the design process. The study considers the application of parametric modeling, algorithmic geometry control, BIM coordination, solar and energy analysis, CFD modeling of air flows, and optimization of the integration of semi-transparent BIPV modules. It is demonstrated that the combination of biomorphic morphology, digital form-generation methods, and energy-efficient façade solutions forms a promising direction for the development of contemporary public architecture in coastal urban environments. *Key words:* biomorpho-algorithmic synthesis, sustainable development, green building, energy efficiency, public buildings, BIPV, digital technologies.



Постановка проблеми. Будівельний сектор є одним із найбільших споживачів енергії, на нього припадає ~34–36% світового енергоспоживання, включно з виробництвом будівельних матеріалів та експлуатацією будівель [1]. Цей сектор також відповідає за значну частку викидів парникових газів, що робить його ключовим у питаннях енергоефективності.

Євросоюз прагне досягти кліматичної нейтральності до 2050 року, що включає декарбонізацію будівельного сектору. Ключові заходи передбачають масштабну реновацію громадських об'єктів для високої енергоефективності, використання відновлюваних джерел енергії та скорочення викидів CO₂ до нуля, що є частиною стратегії європейського «Зеленого курсу» [2]. Для України, як кандидата в члени ЄС, ці підходи стають визначальними орієнтирами післявоєнної відбудови. Це означає, що нові громадські об'єкти вже зараз варто проектувати відповідно до європейських стандартів енергонезалежності.

Особливо актуальними стають енергоефективні громадські об'єкти, що поєднують пасивні рішення (теплоізоляція, природне освітлення та вентиляція) із активними технологіями (BIPV-фасади, системи рекуперації енергії, розумне управління), що забезпечує зниження експлуатаційних витрат і скорочення вуглецевого сліду [3].

Водночас сучасна практика свідчить про домінування інженерно-технологічного підходу до забезпечення енергоефективності, тоді як потенціал архітектурно-планувальних рішень часто залишається недостатньо реалізованим. У цьому контексті енергоефективність будівель доцільно розглядати як інтегральну характеристику, що формується не лише за рахунок інженерних систем, але й на рівні архітектурного проектування.

Недостатньо дослідженими залишаються можливості інтеграції біоморфних принципів формоутворення з алгоритмічним моделюванням, що потенційно дозволяє оптимізувати енергетичні, конструктивні та просторові характеристики будівель, підвищити їх адаптивність до умов місцевого середовища та сприяти забезпеченню сталого розвитку.

Мета дослідження. Метою статті є обґрунтування біоморфно-алгоритмічного синтезу як ефективного підходу до формування енергоефективних громадських будівель і перевірка цього підходу на прикладі концептуального проекту культурного центру у прибережній зоні. Для досягнення мети поставлено такі завдання: уточнити зміст поняття біоморфно-алгоритмічного синтезу; виявити зв'язок між архітектурною формою та енергоефективністю; доповнити опис об'єкта блоком про цифрові технології проектування; охарактеризувати потенціал BIPV-інтеграції та фасадної оболонки; узагальнити відповідність проекту принципам зеленої сертифікації.

Актуальність дослідження. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю впровадження принципів сталого та енергоефективного будівництва у розвиток прибережних міст України. Ці міста мають значний потенціал, однак водночас характеризуються складними природно-кліматичними умовами: підвищеною вітровою активністю, впливом солоного морського повітря, інтенсивною інсоляцією та необхідністю раціонального використання прибережних територій.

У таких умовах особливо важливим є застосування архітектурних рішень, здатних поєднати виразну просторову організацію громадських об'єктів із високою енергоефективністю та адаптацією до морського клімату.

В період післявоєнної відбудови України саме приморські зони здатні відіграти роль потужного двигуна економічного відновлення, запуску інноваційних проєктів та розширення міжнародної співпраці. Впровадження сучасних архітектурних рішень для створення культурно-туристичних і рекреаційних комплексів з обов'язковим застосуванням екологічно чистих технологій, принципів «зеленого» будівництва та біопозитивного дизайну дозволить суттєво підвищити стійкість чорноморського узбережжя до екологічних викликів, покращити якість міського середовища та закріпити за Україною статус активного учасника розвитку блакитної економіки [4].

Біоморфно-алгоритмічний підхід у проектуванні дозволяє формувати архітектурні оболонки, які оптимізують сонячні надходження, природне освітлення, вентиляцію та взаємодію будівлі з навколишнім середовищем. Отже, дослідження можливостей біоморфно-алгоритмічного формоутворення та енергоефективних фасадних систем у проектуванні прибережних громадських об'єктів є актуальним для сучасного етапу розвитку чорноморських міст України та відповідає глобальним тенденціям сталого архітектурного проектування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останні роки у науковій літературі спостерігається посиленна увага до інтеграції сталого будівництва, цифрового проектування та біоміметичних підходів у архітектурі. Це зумовлено глобальними викликами кліматичної зміни, необхідністю зниження енергоспоживання та прагненням підвищити адаптивність споруд до природно-кліматичних умов.

Теоретичні основи сталого архітектурного дизайну сформульовано в працях Чарльза Дж. Кіберта, який розглядає енергоефективність як системну характеристику будівельного об'єкта протягом усього його життєвого циклу [5]. Проблематику біоміметики в архітектурі досліджує М. Полін, який розглядає природні системи як джерело ефективних конструктивних і просторових рішень [6]. Роботи Рівки Оксмана та Роберта Оксмана, а також А. Менгеса і С. Алквіста розглядають цифрову архі-

тектуру не просто як інструмент моделювання, а як окрему логіку мислення, у якій форма генерується через параметри, зв'язки та поведінку системи [7, 8]. У галузі енергоефективності значний внесок зробили дослідження Ш. Аттії, присвячені стратегіям проєктування будівель із низьким рівнем енергоспоживання [9]. Окремим напрямом сучасних досліджень є розвиток міжнародних систем оцінювання сталості будівель, зокрема LEED та BREEAM, які встановлюють критерії екологічної ефективності архітектурних об'єктів [10, 11].

Сучасні публікації також приділяють значну увагу енергоефективним фасадним технологіям, зокрема інтеграції фотоелектричних систем у конструкції будівель (BIPV – Building-Integrated Photovoltaics) [12, 13].

В українських наукових працях розглядаються питання оптимізації конструктивних і технологічних рішень з урахуванням енергозбереження [14], підвищення ефективності огорожувальних конструкцій [15], а також впровадження BIM-технологій у процес проєктування [16]. Окремі дослідження узагальнюють практичний досвід створення енергоефективних громадських будівель в Україні [17].

Узагальнення сучасних досліджень показує, що хоча окремі аспекти сталого проєктування, біоміметики та цифрового моделювання достатньо добре опрацьовані, комплексне поєднання біоморфної морфології з алгоритмічним формоутворенням у проєктуванні прибережних громадських об'єктів залишається недостатньо дослідженим, що визначає наукову та практичну актуальність цього дослідження.

Біоморфно-алгоритмічний синтез – сучасний підхід у архітектурному проєктуванні, що поєднує принципи органічної, біоморфної структури природних систем із алгоритмічним та параметричним моделюванням. Він дозволяє створювати складні, футуристичні об'єкти, які при цьому споживають мінімум ресурсів і органічно вписуються в екосистеми.

Ключові особливості напрямку:

1. Біомімікрія (живі форми). Будівлі запозичують структуру природних об'єктів (муслі, листя, скелетів тощо), а не лише їх форму.

2. Параметричне моделювання (алгоритми). Архітектор задає параметри (силу вітру, кількість сонячного світла, рельєф), а алгоритм сам формує оптимальну форму будівлі, яка буде максимально стійкою та енергоефективною.

3. Екологічність (зелене будівництво):

– Економія матеріалів завдяки точним алгоритмічним розрахункам.

– Саморегуляція фасадів – зміна куту нахилу панелей залежно від сонця, або «дихання» оболонки з метою мінімізації енергоспоживання.

– Інтеграція флори – вертикальні сади або використання біоматеріалів (наприклад, цегли з міцелію грибів).

Синтез біонічної морфології та алгоритмічного формоутворення передбачає інтеграцію двох взаємопов'язаних підходів у процесі архітектурного проєктування.

Біонічна морфологія базується на принципах природних систем – пластичній безперервності, структурній раціональності, адаптивності до середовища та мінімізації матеріальних витрат, що дозволяє формувати конструктивно та функціонально ефективні архітектурні оболонки (рис. 1).

Алгоритмічне формоутворення переводить форму в систему параметрів, керованих цифровими методами, що дає змогу контролювати кривину поверхонь, щільність структурних елементів, орієнтацію фасадів, рівень світлопроникності та енергетичні показники окремих зон (рис. 2).

У результаті синтезу біонічні принципи служать основою для естетично виразної та екологічно адаптованої форми, а алгоритмічні методи забезпечують її параметричну керованість, конструктивну оптимізацію та інтеграцію енергоефективних рішень, що особливо важливо для громадських та прибережних об'єктів складної геометрії (рис. 3).

Поєднання біонічних принципів із алгоритмічними методами дозволяє інтегрувати енергоефективні рішення безпосередньо у структуру архітектурної форми (табл. 1). У такому підході фасадні оболонки, конструктивні системи та світлопрозорі елементи можуть працювати як інструменти регулювання мікроклімату будівлі, оптимізації інсоляції та зниження енергоспоживання.

Таким чином, синтез біонічної морфології та алгоритмічного формоутворення створює основу для формування нових архітектурних рішень, у яких естетика, конструкція та екологічна ефективність поєднуються в єдину систему сталого проєктування.

Викладення основного матеріалу. Застосування біоморфно-алгоритмічного синтезу розглянуто на прикладі проєкту культурного центру, що поєднує туристичні, рекреаційні та культурні функції (рис. 4). Проєктування здійснюється з урахуванням прибережного розташування, відкритої акваторії, солоного повітря, вітрових навантажень і насипних ґрунтів, що впливає на конструктивну та фасадну стратегію будівлі.

Територія земельної ділянки становить 4,9 га, а будівля задумана як багатофункціональний комплекс загальною площею близько 28,7 тис. м², до складу якого входять театральні-концертні, виставкові, освітні та громадські простори.

Архітектурний образ центру формує криволінійна оболонка, яка створює динамічний силует на тлі водної поверхні (рис. 5). Така геометрія забезпечує перетікання зовнішнього простору в інтер'єр, формує захищені громадські зони вздовж набережної та світлопрозорі фасадні площини. У результаті архітектурна форма виконує не лише образну, а й кліматичну та функціональну роль.



Рис. 1. Схема "Природний прототип → архітектурна форма"



Рис. 2. Параметричне формоутворення: Walt Disney Concert Hall, Galaxy SOHO



Рис. 3. Комбіновані підходи: Heydar Aliyev Center, Guangzhou Opera House

Біонічна морфологія та алгоритмічне формоутворення

Підхід	Приклади	Основні принципи та функції
Біонічна морфологія	Lotus Temple (Делі, Індія)	Органічна біоморфна форма, натхнення лотосом; забезпечує природне освітлення та пластичну композицію простору.
	Eastgate Centre (Хараре, Зімбабве)	Натхнення природними вентиляційними системами термітників, пасивна кліматична регуляція будівлі.
	Water Cube (Пекін, Китай)	Структура натхнення бульбашками мильного розчину, оптимізація міцності та природного освітлення.
Алгоритмічне формоутворення	Yas Hotel Abu Dhabi (Абу-Дабі, ОАЕ)	Алгоритмічний фасад для контролю сонячного освітлення, прозорості та візуальної динаміки.
	Walt Disney Concert Hall (Лос-Анджелес, США)	Параметричні криволінійні форми з оптимізацією акустики та фасадної геометрії.
	Galaxy SOHO (Пекін, Китай)	Алгоритмічно генеровані плавні об'єми для інтеграції пішохідних маршрутів і внутрішніх дворів.
Комбіновані підходи (біоніка + алгоритміка)	Beijing National Stadium (Пташине гніздо, Пекін, Китай)	Біоморфна переплетена структура з алгоритмічною генерацією форми; забезпечує міцність, естетику та оптимізацію простору.
	Heydar Aliyev Center (Баку, Азербайджан)	Плавні біоморфні форми з алгоритмічною генерацією; поєднує естетику та конструктивну адаптивність.
	Guangzhou Opera House (Гуанчжоу, Китай)	Органічна біоморфна форма з алгоритмічною генерацією; поєднує плавність силуету, конструктивну оптимізацію та просторову адаптивність.

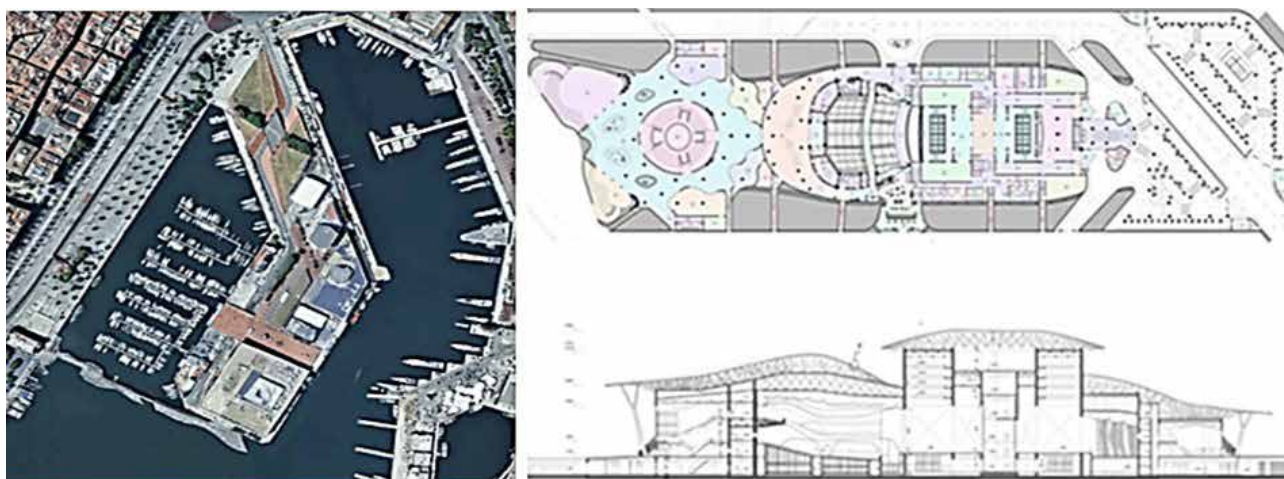


Рис. 4. Генеральний план об'єкту



Рис. 5. Візуальний ряд будівлі, перспективи

Цифрові технології формування об'єкта. Параметричне моделювання дозволяє керувати конфігурацією оболонки через систему змінних параметрів: кривизну поверхонь, орієнтацію фасадних сегментів, ступінь прозорості, розміщення BIPV-модулів, інсоляцію ділянок та просторові зв'язки з навколишнім середовищем. Зміна одного параметра впливає на просторову, конструктивну та енергетичну конфігурацію будівлі.

Важливим інструментом є BIM-координація, яка об'єднує архітектурну, конструктивну та інженерну моделі в єдиному цифровому середовищі. Додатково застосовуються інсоляційний аналіз і CFD-моделювання, що дозволяє оцінювати сонячне навантаження, ризик перегріву та поведінку повітряних потоків у відкритих просторах. У результаті цифрові технології стають основою прийняття архітектурних рішень.

Екологічна та енергоефективна складові. Світлопрозора оболонка є ключовим елементом концепції, виконуючи естетичну, кліматичну та енергетичну функції (рис. 6).

Для контролю теплових надходжень застосовано багатошарову фасадну систему з вентиляваним прошарком між зовнішньою оболонкою та тепловим контуром будівлі. Це зменшує перегрів у літній період і стабілізує внутрішній мікроклімат. Інтеграція напівпрозорих BIPV-модулів дозволяє поєднати огорожувальну, енергогенерувальну та архітектурну функції. Біоморфна геометрія оболонки дає змогу варіювати ступінь прозорості фасаду відповідно до мікрокліматичних потреб різних зон будівлі.

«Зелений» образ об'єкта передбачає створення озелених публічних зон, які поєднують будівлю з існуючою набережною та пішохідними маршрутами уздовж акваторії порту. Використання відкритих терас, прогулянкових зон і громадських площ формує комфортне середовище та сприяє покращенню мікроклімату міського простору.

Оцінка за критеріями «зеленої» сертифікації. З позицій LEED та BREEAM проєкт має потенціал

відповідати основним критеріям сталого проєктування. Розміщення в межах сформованої міської інфраструктури сприяє повторному використанню урбанізованої території, а інтеграція громадських просторів і ландшафтного благоустрою підвищує соціальну цінність середовища. Багатошарова фасадна система, використання природного освітлення, вентиляції та BIPV-технологій відповідають принципам скорочення експлуатаційного енергоспоживання та часткового залучення відновлюваної енергії.

Важливо, що екологічна сертифікація має застосовуватися вже на ранніх етапах концептуального проєктування, коли визначаються конфігурація мас, характер озеленення та ресурсна логіка будівлі. Саме біоморфно-алгоритмічний підхід дозволяє інтегрувати ці критерії безпосередньо в процес формування архітектурної форми.

Висновки. У статті обґрунтовано ефективність біоморфно-алгоритмічного синтезу як підходу до формування енергоефективних громадських будівель у прибережних умовах. Встановлено, що інтеграція біоморфної морфології та параметричного моделювання дозволяє поєднати архітектурну виразність із кліматичною адаптивністю та конструктивною доцільністю.

Доведено, що архітектурна форма може виконувати функцію активного регулятора інсоляції, вентиляції та теплових надходжень. На прикладі проєкту культурного центру підтверджено ефективність використання криволінійних оболонок, багатошарових фасадів і BIPV-технологій для зниження енергоспоживання.

Визначено, що застосування цифрових інструментів (BIM, інсоляційного та CFD-аналізу) забезпечує комплексну оптимізацію проєктних рішень. Показано відповідність запропонованого підходу принципам міжнародних систем зеленої сертифікації. Отримані результати підтверджують доцільність впровадження біоморфно-алгоритмічного проєктування у практику розвитку прибережних міст України.



Рис. 6. Світлопрозора оболонка та «зелений» ландшафт об'єкта

Література

1. Global Status Report for Buildings and Construction 2024–2025: not just another brick in the wall: the solutions exist. Scaling them will build on progress and cut emissions fast / United Nations Environment Programme. 2025. URL: <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/47214> (дата звернення: 17.03.26).
2. The European Green Deal / European Commission. Brussels, 2019. URL: <https://commission.europa.eu> (дата звернення: 17.03.26).
3. Архітектурно-конструктивні енергоефективні оболонки будівель та споруд / Лісенко В. А., Суханов В. Г., Закорчемний Ю. О., Верьовкіна С. С. Одеса: Optimum, 2015. 254 с.
4. New approach for a sustainable blue economy in the EU / European Commission. Brussels, 2021. URL: <https://ec.europa.eu> (дата звернення: 15.03.26).
5. Kibert C. J. Sustainable construction: green building design and delivery. 5th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2022. 656 p.
6. Pawlyn M. Biomimicry in Architecture. 2nd ed. London: RIBA Publishing, 2019. 176 p.
7. Oxman R., Oxman R. Theories of the Digital in Architecture. London: Routledge, 2014. 456 p.
8. Menges A., Ahlquist S. Computational Design Thinking. Chichester: Wiley, 2011. 224 p.
9. Attia S. Net Zero Energy Buildings (NZEB): Concepts, Frameworks and Roadmap for Project Analysis and Implementation. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2018. 382 p. DOI: 10.1016/C2016-0-03166-2
10. LEED v4.1 for building design and construction / U.S. Green Building Council. 2019. URL: <https://www.usgbc.org> (дата звернення: 17.03.26).
11. BREEAM international new construction: technical manual / BRE Global. 2021. URL: <https://www.breeam.com> (дата звернення: 17.03.26).
12. Farkas K., Frontini F. Building-Integrated Photovoltaics (BIPV) in Sustainable Architecture. *Renewable Energy*. 2015. Vol. 78. P. 87–95.
13. Building-integrated photovoltaics / A. Faes et al. *Nature Reviews Clean Technology*. 2025. Vol. 1, No. 5. DOI: <https://doi.org/10.1038/s44359-025-00059-9> (дата звернення: 15.03.26).
14. Сучасна архітектура та енергоефективність / О. І. Філоненко та ін. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2022. Вип. 202. С. 27–35. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpudazt_2022_202_6 (дата звернення: 17.03.26).
15. Назаренко О.М., Бейнер Н.В., Бейнер П.С. Комплексний підхід до проектування енергоефективних будівель на основі BIM. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2023. № 1. С. 66–73. DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.280223.66.920> (дата звернення: 18.03.26).
16. Нестеренко В., Давидов А. Досвід та засоби параметричного проектування житлових будівель. *Вісник Національної академії образотворчого мистецтва і архітектури*. 2025. № 3. С. 49–59. DOI: <https://doi.org/10.32782/naoma-bulletin-2025-3-6> (дата звернення: 15.03.2026).
17. Уреньов В. П., Бахтін Д. С. Досвід проектування енергоефективних громадських будівель державної власності в Україні. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. 2020. № 57. С. 322–339. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Spam_2020_57_27 (дата звернення: 17.03.26).

Дата першого надходження статті до видання: 26.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ЕКОЛОГІЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНО-ЛОГІСТИЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ ВІДПОВІДНО ДО ПРИНЦИПІВ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Шелудченко Л.С., Комарніцький С.П., Фірман Ю.П.

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»

вул. Шевченка, 13, 32300, м. Кам'янець-Подільський

sheludchenkol@pdatu.edu.ua, komarniskysp@pdatu.edu.ua, yurii.firman@pdatu.edu.ua

У статті розглянуті особливості трансформації традиційної моделі управління транспортно-логістичними процесами в умовах переходу до концепції сталого розвитку. Встановлено, що у традиційній логістичній системі планування перевезень здійснюється без належного врахування екологічних обмежень, що призводить до формування надлишкових транспортних потоків, перевантаження дорожньої мережі, підвищення енергоспоживання та зростання рівня забруднення довкілля. Авторами обґрунтована необхідність переходу до інтегрованої моделі управління транспортно-логістичними системами на засадах зеленої логістики відповідно до умов сталого розвитку суспільства. Запропонований авторами концептуальний підхід, який базується на інтегуванні індикаторів вуглецевого навантаження, ресурсоефективності та екологічного ризику, який формує єдину систему оцінювання для комплексного аналізу екологічної ефективності логістичних систем. Запропонований підхід актуальний при плануванні розвитку транспортної інфраструктури, розробленні стратегій зеленої логістики та формуванні екологічно безпечних транспортних систем. Окрім того, узагальнено теоретико-методичні підходи до впровадження принципів зеленої логістики та акцентовано роль державного регулювання, організації транспортної інфраструктури, необхідності впровадження інформаційно-аналітичних технологій і екологічно оптимізованих логістичних рішень у забезпеченні сталого розвитку транспортної галузі. Звернена увага на те, що впровадження принципів зеленої логістики сприяє підвищенню економічної ефективності транспортної інфраструктури, зменшенню екологічних ризиків та забезпеченню відповідності транспортних систем сучасним міжнародним вимогам у сфері сталого розвитку. Визначено перспективи подальших досліджень, які полягають у розробленні інтегрованих моделей управління транспортними системами на основі цифровізації, принципів циркулярної економіки та оцінювання життєвого циклу транспортної інфраструктури з урахуванням екологічних, енергетичних і соціальних показників. *Ключові слова:* транспортно-логістична діяльність, сталий розвиток, зелена логістика, екологічна безпека.

Theoretical framework for the environmentalization of transport and logistics activities in the context of sustainable development principles. Sheludchenko L., Komarnitskyi S., Firman Yu.

The article examines the features of the transformation of the traditional model of transport and logistics process management under the conditions of transition to the concept of sustainable development. It has been established that in the traditional logistics system, transportation planning is carried out without proper consideration of environmental constraints, which leads to the formation of excessive transport flows, overloading of the road network, increased energy consumption, and a higher level of environmental pollution. The authors substantiate the necessity of transitioning to an integrated model of transport and logistics system management based on the principles of green logistics, which involves the combination of economic, environmental, and social efficiency criteria. Theoretical and methodological approaches to the implementation of green logistics principles in transport systems are generalized, and the role of state regulation, organization of transport infrastructure, the need for the implementation of information and analytical technologies, and environmentally optimized logistics solutions in ensuring the sustainable development of the transport sector is determined. It has been proven that the implementation of green logistics principles contributes to increasing the economic efficiency of transport infrastructure, reducing environmental risks, and ensuring the compliance of transport systems with modern international requirements in the field of sustainable development. Prospects for further research are identified, which consist in the development of integrated models for managing transport systems based on digitalization, the principles of the circular economy, and the assessment of the life cycle of transport infrastructure, taking into account environmental, energy, and social indicators. *Key words:* transport and logistics systems, sustainable development, green logistics, environmental safety, transport infrastructure, ecological safety.

Постановка проблеми. Актуальність екологізації транспортно-логістичної діяльності в умовах глобальних кліматичних змін та зростання антропогенного навантаження на довкілля набуває особливого значення. Варто відзначити, що транспортний

сектор є одним із найбільших джерел забруднення атмосферного повітря, шумового навантаження та порушення стану природних екосистем загалом, що суттєво впливає на стан екологічної безпеки [1]. У зв'язку з цим виникає необхідність переходу



до екологічно орієнтованих моделей управління транспортно-логістичними системами [2]. Одним із таких напрямків вирішення зазначеної проблеми є впровадження принципів зеленої логістики, яка передбачає раціональне планування транспортних потоків, оптимізацію маршрутної мережі, зменшення енергоспоживання, використання екологічно безпечних видів транспорту та мінімізацію негативного впливу на довкілля. Таким чином необхідність адаптації національної транспортної системи до сучасних міжнародних екологічних вимог, орієнтація суспільства на принципи сталого розвитку та впровадження європейських підходів до формування екологічно безпечної транспортної інфраструктури є принципово важливими напрямками розвитку, що потребує змін і в транспортно-логістичній діяльності. Саме тому застосування принципів зеленої логістики, як одного із інструментів забезпечення сталого розвитку транспортних систем, є важливим науковим і практичним міждисциплінарним завданням у галузі транспортних технологій та екологічної безпеки.

Актуальність досліджень. Загальна концепція сталого розвитку передбачає гармонійне поєднання економічних, соціальних та екологічних інтересів суспільства, що повною мірою відповідає основним принципам зеленої логістики [3, 4]. Впровадження екологічно орієнтованих логістичних технологій дозволяє досягти збалансованого розвитку транспортних систем шляхом оптимізації використання ресурсів, підвищення безпеки перевезень та збереження природного середовища.

Отже, зелена логістика забезпечує досягнення балансу інтересів шляхом впровадження комплексного підходу до управління транспортно-логістичними процесами, що створює передумови для формування екологічно безпечних, економічно ефективних і соціально орієнтованих транспортних систем, що відповідають сучасним вимогам сталого розвитку.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Практичне значення дослідження полягає у можливості використання запропонованих теоретичних положень та методичних підходів для удосконалення управління транспортно-логістичними системами з урахуванням принципів зеленої логістики та сталого розвитку. Запропонований підхід створює науково обґрунтовану основу для формування соціально відповідальної моделі функціонування транспортних систем в Україні, що передбачає поєднання економічної ефективності, екологічної безпеки та соціальної орієнтованості транспортних перевезень. Використання принципів зеленої логістики дозволяє забезпечити раціональне використання транспортної інфраструктури, зменшити рівень техногенного навантаження на довкілля, зберігаючи якість надання транспортно-логістичних послуг. Крім того,

впровадження принципів зеленої логістики забезпечує наближення законодавства України до міжнародних екологічних стандартів, що створює передумови для інтеграції транспортної системи України до європейського транспортного простору та сприяє реалізації стратегічних напрямів сталого розвитку держави.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних наукових дослідженнях впровадження зеленої логістики здійснюється шляхом міждисциплінарного підходу, який поєднує принципи логістики, екологічної безпеки та сталого розвитку. Більшість авторів визначають зелену логістику як систему управління матеріальними, транспортними та інформаційними потоками, спрямовану на мінімізацію негативного впливу логістичної діяльності на довкілля при одночасному забезпеченні економічної ефективності та необхідного рівня сервісу [1, 2, 5, 6].

У вітчизняних наукових джерелах підкреслюється, що традиційна логістика орієнтована, в першу чергу, на зниження витрат та підвищення продуктивності. Проте врахування екологічних обмежень, зокрема рівень викидів парникових газів, споживання енергетичних ресурсів та вплив на природні екосистеми майже не враховуються. У зв'язку з цим, впровадження зеленої логістики має розглядатися як розширена модель логістичного управління, яка інтегрує не лише економічні та соціальні критерії ефективності, а й екологічні. Підкреслено, що відсутність єдиного визначення зеленої логістики зумовлюється різними підходами до її трактування в залежності від рівня застосування. Проте, в більшості досліджень зелена логістика розглядається як важлива складова концепції сталого розвитку та елемент корпоративної соціальної відповідальності, який залежить від системи управління логістичними потоками. Такі підходи підтверджують комплексний характер зеленої логістики та необхідність використання інтегрованих методів оцінювання її ефективності [7, 8].

В свою чергу, міжнародний досвід свідчить, що впровадження зеленої логістики є одним із пріоритетних напрямів розвитку транспортних систем у країнах Європейського Союзу, США та країнах Азії [9]. У цих країнах екологізація логістичних процесів здійснюється шляхом реалізації державних програм декарбонізації транспорту, розвитку енергоефективних технологій та переходу до низьковуглецевих моделей перевезень. Важливу роль при цьому відіграють екологічні стандарти, які встановлюють суворі вимоги щодо зменшення викидів, підвищення енергоефективності та використання альтернативних видів палива [10].

Отже, аналіз останніх досліджень демонструє, що зелена логістика розглядається як важливий стратегічний інструмент забезпечення сталого розвитку транспортних систем в цілому, а її ефективне впровадження можливе лише за умови комплексного

поєднання екологічних вимог, економічної доцільності та сучасних інформаційно-аналітичних технологій управління транспортними потоками.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Сучасні підходи до організації транспортно-логістичних процесів переважно орієнтовані на зменшення економічних витрат та підвищення продуктивності перевезень, проте у сучасних умовах сталого розвитку суспільства обумовлюється необхідність інтеграції екологічних принципів у традиційні логістичні системи. Дана робота акцентує увагу на необхідності впровадження екологічних принципів у логістичні системи, що є необхідною умовою реалізації концепції зеленої логістики та забезпечення сталого розвитку транспортних систем. Такий підхід дозволить поєднати економічну ефективність надання транспортно-логістичних послуг із вимогами екологічної безпеки, що підвищить ресурсоефективність та створить передумови для формування екологічно збалансованих транспортно-логістичних систем, які відповідають сучасним міжнародним стандартам.

Новизна. Узагальнено теоретико-методичні підходи до впровадження в традиційну модель транспортно-логістичної системи принципів зеленої логістики відповідно до умов сталого розвитку, запропоновано комплексне поєднання економічних, екологічних і соціальних критеріїв ефективності функціонування транспортних систем, що забезпечує підвищення їх ресурсоефективності, екологічної безпеки та адаптивної стійкості в умовах сучасних викликів.

Методологічне або загальнонаукове значення. Загальнонаукове значення впровадження зеленої логістики в умовах переходу до сталого розвитку суспільства полягає у формуванні актуальної парадигми управління транспортно-логістичними системами, яка базується на поєднанні економічної ефективності, екологічної безпеки та соціальної відповідальності. Такий підхід змінює традиційне уявлення про логістику і розглядає її як складну бага-

тофакторну систему, функціонування якої повинно узгоджуватися з принципами екологічної безпеки та сталого розвитку.

Виклад основного матеріалу. Характерною особливістю традиційної моделі транспортно-логістичної системи є використання показників ефективності, що базуються на економічних критеріях [11]. При цьому, при прийнятті управлінських рішень питання впливу діяльності на якість об'єктів навколишнього середовища, на стан придорожніх територій та якість життя населення, як правило, не розглядаються як визначальні фактори [12]. При впровадженні зеленої логістики на основі принципів сталого розвитку відбувається узгодження економічних, екологічних та соціальних інтересів при плануванні та функціонуванні транспортно-логістичної діяльності [13]. Саме такий підхід змінює традиційну модель на інтегровану, яка забезпечує узгоджене функціонування всіх елементів транспортно-логістичної системи на основі комплексного підходу (табл. 1).

Окрім того, перехід до моделі сталого розвитку передбачає необхідність розроблення науково обґрунтованих підходів до оцінки екологічної ефективності логістичних процесів. У зв'язку з цим доцільним є формування концептуального підходу, який ґрунтується на використанні системи взаємопов'язаних інтегрованих індикаторів, що дозволяють комплексно оцінити рівень екологічної безпеки та ефективність функціонування транспортно-логістичних систем таких як: індикатор вуглецевого навантаження (характеризує обсяг викидів парникових газів), показник ресурсоефективності (відображає рівень раціонального використання матеріальних, енергетичних та природних ресурсів), індикатор екологічного ризику (характеризує ймовірність виникнення негативних наслідків для навколишнього природного середовища) [14]. Даний підхід необхідно застосовувати при плануванні розвитку транспортної інфраструктури, розробленні стратегій зеленої логістики та формуванні екологічно безпечних транспортних систем.

Таблиця 1

Інтегрована модель транспортно-логістичних систем

Складові інтегрованої моделі	Особливості застосування
Системність	Об'єкт дослідження розглядається як складова цілісної системи, структурні елементи якої перебувають у тісному взаємозв'язку та взаємодії.
Наукова обґрунтованість	Управлінські рішення формуються на основі аналітичних даних, результатів наукових досліджень та математичного моделювання.
Орієнтація на принципи сталого розвитку	Гармонізація економічних, соціальних та екологічних складових розвитку.
Адаптивна стійкість	Спроможність системи забезпечувати ефективне функціонування на основі застосування адаптивних механізмів управління.
Міждисциплінарність	Міждисциплінарна інтеграція наукових підходів з метою комплексного аналізу досліджуваної проблеми.

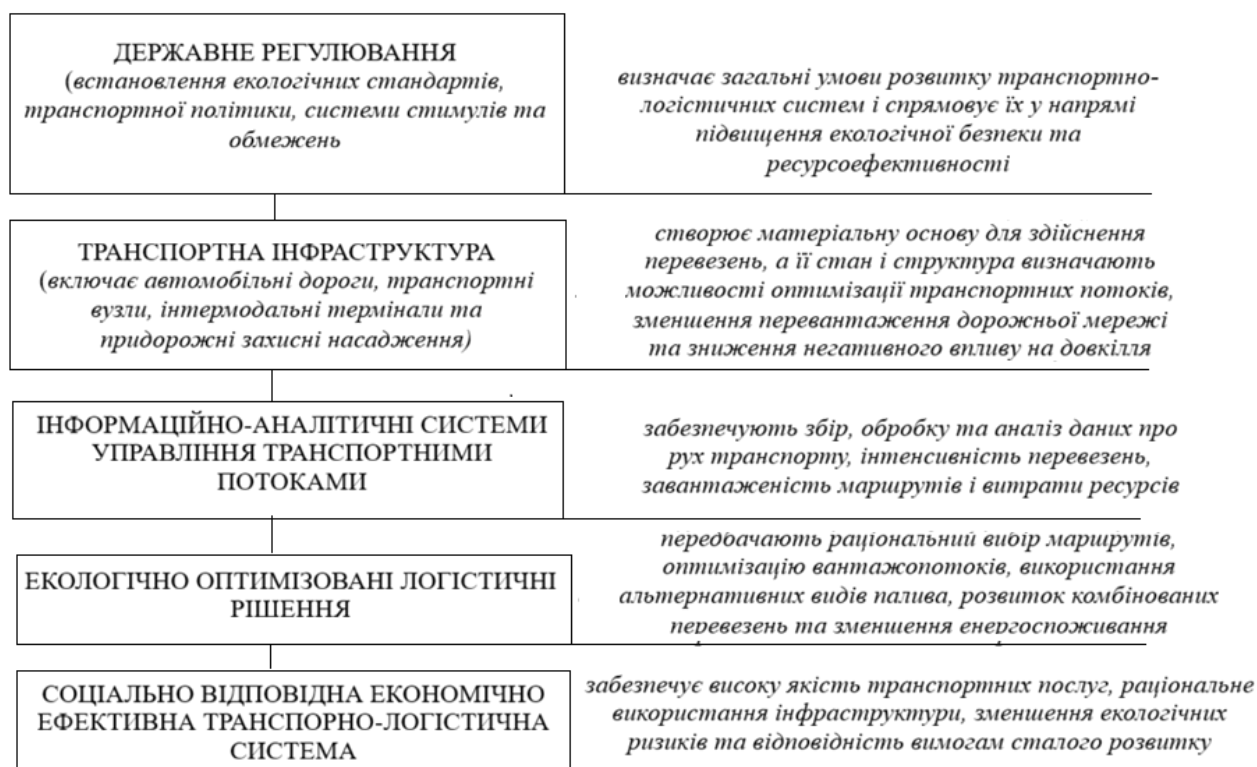


Рис. 1. Структурно-функціональна модель інтегрованого управління транспортно-логістичною системою на принципах зеленої логістики та сталого розвитку

Таким чином нами запропонована структурно-функціональна модель інтегрованого управління транспортно-логістичною системою, яка відображає послідовний та логічний взаємозв'язок між державним регулюванням, транспортною інфраструктурою, інформаційно-аналітичною системою управління, логістичними рішеннями та кінцевим результатом у вигляді соціально відповідної та економічно ефектної транспортної системи з мінімальним екологічним впливом (рис. 1).

Структурно-функціональна модель інтегрованого управління транспортно-логістичною системою демонструє комплексну взаємодію нормативного регулювання, технічної інфраструктури, цифрових технологій управління та екологічно орієнтованих логістичних рішень, які побудовані на принципах зеленої логістики відповідно до умов сталого розвитку.

Головні висновки. З точки зору сучасних принципів сталого розвитку, впровадження принципів зеленої логістики набуває суттєвого загальнонаукового значення, оскільки сприяє формуванню нової

парадигми функціонування транспортно-логістичної системи орієнтованої на забезпечення ресурсоефективності та збереження природного середовища. Реалізація концепції зеленої логістики створює передумови для ефективної інтеграції національних транспортних систем у глобальний транспортний простір, забезпечуючи їх відповідність сучасним міжнародним вимогам у сфері енергоефективності, екологічної безпеки та раціонального використання ресурсів. Така інтеграція сприяє підвищенню конкурентоспроможності транспортної галузі та формує основу для її сталого розвитку в довгостроковій перспективі.

Перспективи подальших досліджень у даній тематиці пов'язані з необхідністю поглиблення теоретико-методичних засад впровадження принципів зеленої логістики, а зокрема розроблення інтегрованих моделей управління транспортними процесами на основі цифровізації, використання інформаційно-аналітичних технологій та інтелектуальних транспортних систем, застосування принципів циркулярної економіки.

Література

1. Тараєвська Л. С., Галюк І. Б. Екологізація виробництва: логістичні аспекти. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. Серія: економіка та управління в нафтовій і газовій промисловості*. 2025. № 1 (31). С. 120–127.
2. Резнік Н. П., Мариніна О. Л. «Зелена» логістика у бізнесі логістичних перевезень: перспективи та особливості розвитку «зеленої» логістики у бізнесі для України. *Український журнал прикладної економіки та техніки*. 2024. Том 9, № 1. С. 62–66.

3. «Євротермінал» про те, що таке «зелена логістика» і як її застосовувати. *УНН* : веб-сайт. URL: <https://www.unn.com.ua/uk/news/1929434-yevroterminal-pro-te-scho-take-zelena-logistika-i-yak-yiyi-zastosovuvati> (дата звернення: 27.03.2026).
4. «Зелена» логістика: теорія та механізми : веб-сайт. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/14061392.pdf> (дата звернення: 26.03.2026).
5. Grytsenko S. I., Savchenko L. V., Kryshtal S. Conceptual principles of the “green” technologies introduction in the logistics activities of Ukrainian companies in the context of the implementation of European environmental programs. *Intellectualization of Logistics and Supply Chain Management*. 2022. Vol. 13. P. 15–6.
6. Strychalska-Rudzewicz A., Kowalska A. Innovations in logistics infrastructure. *Logistics in an Era of Technological and Global Change: Infrastructure, Management and Sustainable Development* : collective monograph. Ostrołęka (Poland), 2026. P. 19–38.
7. Шелудченко Л. С., Комарніцький С. П., Фірман Ю. П., Мельник В. А. Застосування комплексного підходу при вирішенні складних завдань в галузі транспортних технологій в умовах сталого розвитку суспільства. *Modernisation of Higher Education in Ukraine in the Context of Globalisation* : monograph / ed. by A. M. Ivanovska. Riga (Latvia), 2025. P. 252–260.
8. Бойченко М.В. Зелена логістика вантажоперевезень: проблеми, шляхи вирішення. *Вісник економічної науки України*. 2021. № 2 (41). С. 152-155
9. Кобилянська Т. Світовий досвід статистичного оцінювання ефективності зеленої логістики. *Проблеми економіки*. 2019. № 4 (42). С. 209–214.
10. Андріанов В. Основний тренд європейської логістики – екологічність. *Rail.insider* : веб-сайт. URL: <https://www.railinsider.com.ua/valerij-andrianov-osnovnyj-trend-yevropejskoyilogistyky-ekologichnist/> (дата звернення 27.03.2026).
11. Резнік Н. П., Руденко С. В., Пилипчук К. М. Основні характеристики поняття логістики і системи управління ланцюгами постачань. *Innovation and Sustainability*. 2022. № 3. С. 95–102.
12. Sheludchenko L. S., Firman Y. P. Role of ecological optimization of infrastructure objects of the road network in logistics under the conditions of sustainable development. *Logistics in an Era of Technological and Global Change: Infrastructure, Management and Sustainable Development* : collective monograph. Ostrołęka (Poland), 2026. P. 159–188.
13. Іванов Ю. В., Нагай Д. Р., Сохань Т. Д. Логістика в сучасних умовах розвитку економіки України. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Економіка і управління*. 2025. Т. 36 (75), № 1. С. 72–77.
14. «Зелена» логістика: як прискорити шлях до кліматичної нейтральності. *Mind.ua* : веб-сайт. URL: <https://mind.ua/openmind/20234812-zelena-logistika-yak-priskoriti-shlyah-do-klimatichnoyi-nejtralnosti> (дата звернення 25.03.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 30.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

ФОРМУВАННЯ ЗЕЛЕНИХ КОРИДОРІВ ЛІВОБЕРЕЖНОЇ ЧАСТИНИ М. ДНІПРО

Бессонова В.П., Іванченко О.Є., Казинян А.В.

Дніпровський державний аграрно-економічний університет
вул. Сергія Єфремова, 25, 49000, м. Дніпро, Україна
valentinabessonova492@gmail.com; ivanchenko.o.ue@dsau.dp.ua

Розроблено систему «зеленого каркасу», досліджено видовий склад, просторову структуру та віталітетний стан насаджень вулиць, які можуть слугувати «зеленими коридорами» лівобережжя м. Дніпро і складати єдину зелену мережу. У цій частині міста розташовані 7 зелених зон, сумарною площею 261,4 га. Це лісопарк «Дружби народів», сквер Максима Семенова, парк «Козацької слави – Кирилівка», «Сагайдак», сквер біля БК «Комінмет», «Амурський парк» та урочище «Дніпровські піски». Створення суцільних «зелених коридорів» між даними об'єктами стикається з певними труднощами через відсутність центрального ядра, нерівномірне озеленення вулиць, що плануються в якості ланцюгів «зеленого коридору», перетин їх подекуди залізничними коліями та надземними переходами. Слід вказати на достатньо обмежений асортимент деревних рослин на окремих ділянках вулиць, що складають «коридори» між великими зеленими масивами. За віталітетним станом рослини переважно помірно та середньо ослаблені, частка абсолютного здорових рослин незначна. Зустрічаються патології стовбура, такі як морозобійні тріщини, механічні пошкодження, капи, а також його викривлення. Втім, вуличні насадження здебільшого відповідають вимогам щодо окремих ланок таких «коридорів». Спроекувати суцільну мережу зелених насаджень цілком можливо після проведення робіт з їх реконструкції і додаткового озеленення з використанням сучасних методів (контейнерна культура, вертикальне озеленення тощо), а також застосування оптимальних заходів агротехніки догляду за існуючими насадженнями. Проте сформувати повністю замкнену мережу не можливо, оскільки сполучити безпосередньо парк «Сагайдак» і лісопарк «Дружби народів» через передбачувальний «зелений шлях» (проспект Слобожанський) заважає дуже широка залізнична колія (розрив протяжністю 600 м). *Ключові слова:* промислове місто, лівобережжя, парки та сквери, сполучені «зелені шляхи», вуличне озеленення, структура і віталітетний стан, зелений каркас міста.

Formation of green corridors in the left-bank area of Dnipro city. Bessonova V., Ivanchenko O., Kazinyan A.

A “green framework” system has been developed, and street plantings capable of functioning as green corridors in the left-bank area of Dnipro city have been assessed in terms of their floristic composition, spatial structure, and vitality. Seven green areas with a total area of 261.4 hectares are located in this part of the city. These include “Druzhby Narodiv” Forest Park, Maksym Semenov Square, “Kozatskoi Slavy – Kyrilivka” Park, “Sahaidak” Park, the square near the “Kominmet” Cultural Centre, “Amurskyi Park”, and the “Dniproviski Pisky” tract. Creation of continuous “green corridors” between these sites faces certain difficulties due to the absence of a central core, uneven landscaping of the streets planned as “green corridor” chains, and their intersection in some places with railway tracks and overpasses. It should be noted that the assortment of tree species in certain street sections forming the “corridors” between large green areas is rather limited. In terms of vitality condition, most plants are moderately or significantly weakened, while the proportion of completely healthy plants is low. Trunk pathologies are observed, such as frost cracks, mechanical damage, burls, as well as trunk curvature. Nevertheless, street plantings generally meet the requirements for individual segments of such “corridors”. It is entirely possible to design a continuous network of green spaces after carrying out reconstruction work and additional landscaping using modern methods (container-grown plants, vertical greening, etc.), as well as the application of optimal agrotechnical maintenance measures for existing plantings. However, it is impossible to create a completely closed network, as a direct connection between “Sahaidak” Park and the “Druzhby Narodiv” Forest Park via a predictable “green route” (Slobozhansky Avenue) is hindered by a very wide railway corridor (a 600-meter gap). *Key words:* industrial city, left-bank area, parks and squares, interconnected green routes, street greening, structure and vitality condition, urban green framework.

Постановка проблеми. Технологічні розробки та експлуатація значних територій людиною, міграція населення до міст призводить до порушення природних життєвих циклів у міських зонах. Створення екологічної мережі у містах може слугувати вирішенню цих проблем, одночасно розвиваючи видове багатство та покращуючи взаємовідносини між людиною і зеленим простором. Комплексна зелена зона

міста є чинником екологічної безпеки урбоєкосистем [1, с. 21–32]. Формування зелених мереж є неодмінним елементом зростання екологічної рівноваги, оздоровлення повітря, зменшення рівня забруднення міських територій. Зв'язки у просторі запобігають фрагментації місцеіснування диких тварин, що сприяє підтриманню їх різноманітності [2]. Це сприятливо впливає на стан популяцій у міських умовах проживання [3].



«Екологічні коридори» є важливішими протяжними елементами природного каркасу, які з'єднують в єдину безперервну мережу всі його основні і, головне, достатньо великі площинні складові [4, с. 305–319]. Вони інтегрують зелені зони: сквери, парки, бульвари, внутрішньоквартальні й дворові насадження, міські сади тощо [5, с. 31–40], допомагають оптимізувати систему озеленення [6]. Отже, проблема «зелених коридорів» є пріоритетною у зеленому будівництві, особливо в умовах зростаючої урбанізації.

Актуальність дослідження. У м. Дніпро, як індустріальному мегаполісі, необхідно створювати структуровану й ефективну систему озеленення, тому буде дуже доречною концепція «зеленого каркасу». Планування безперервної зеленої мережі в обласному центрі проводилася, але виключно його правобережної частини [7, с. 235–245]. Доцільним буде збільшення масштабування – проведення подібної роботи і в лівобережній частині міста. Все це вказує на важливість розвитку цього напрямку досліджень.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження теоретичних основ та практичних методів формування «зелених коридорів» у міському середовищі є важливою складовою принципів збалансованого розвитку урбанізованих територій та загальної ідеї «місто для людей». Авторський доробок спрямований на вирішення низки важливих проблем, які дозволяють запропонувати схему «зеленого каркасу» з урахуванням міської забудови та кліматичних характеристик дослідної території.

Аналіз останніх наукових досліджень і публікацій. Згідно концепції «зеленої інфраструктури» для моделі «зеленого» міста притаманний мінімум антропогенного впливу на довкілля в рамках сталого розвитку території. Значний досвід з розвитку і втіленні концепції «зеленої» інфраструктури, в тому числі на рівні міст, накопичений як за кордоном, наприклад, у Німеччині [8, с. 29–30; 9, с. 22–29], США [10, с. 305–317], Великобританії [11, с. 383–387] тощо, так і в межах країни. Подібні питання висвітлені у дослідженнях проведених у м. Вінниця [12, с. 83–87], м. Тернопіль [13, с. 8–18], м. Київ [14, с. 269–276], правобережної частини м. Дніпро [7, с. 235–245] та ін.

У зарубіжній практиці ландшафтної організації і створення безперервної системи просторів міста зелені коридори набувають важливого просторово-рекреаційного значення і тому отримали широке розповсюдження. Екологічні, або зелені, коридори забезпечують зв'язок між районними і міськими зеленими просторами та зв'язують їх із заміськими ландшафтно-рекреаційними територіями. Зелені маршрути можуть пролягати вздовж природних або штучних коридорів – міських вулиць і магістралей, традиційних пішохідних зон,

алей, еспланад, бульварів, набережних, річок тощо. Розробка концепції зелених коридорів передбачає посилення естетичності та їх функціональності [15, с. 113]. Описані методики дизайну екологічних коридорів [6].

«Зелені коридори» поєднуються з мережею зелених насаджень, функціонуючи як природні легені міста [11, с. 383–387]. Одна з вимог для існуючих біокоридорів це – безперервність елементів природного каркасу, що зв'язують окремі його частини. О.Ю. Верех [16, с. 45] вказує, що для оптимізації фітоценотичного покриву необхідне формування сітки біоцентрів, пов'язаних біокоридорами. Цей автор розробив критерії оптимальності біоцентричної сіткової структури міського ландшафту, за якими можна розрахувати необхідну кількість біоцентрів різного типу, їх мінімальну площу, оптимальне число біокоридорів, їх довжину, при яких можливі процеси авторегуляції фітоценозу. За розробленою методикою складені схеми оптимальної біоцентричної організації таких міст як Будапешт та Київ. Вказані місця створення нових біоцентрів, а також біокоридорів, тобто вулиць, які слід відповідно озеленювати.

В.П. Бессонова та О.Є. Іванченко [7, с. 235–245] проаналізована зелена мережа правобережжя м. Дніпро. Визначено структуру та стан деревних насаджень вулиць, що можуть відігравати роль зелених коридорів. Створення мережі «зелених коридорів» можливе через часткову реконструкцію насаджень цих вулиць, які поєднують рекреаційні зони міста Дніпро – парки і сквери. Надані рекомендації, в яких врахована відповідність вимог цих рослин екологічним чинникам ділянок: стійкість до антропогенного забруднення, здатність зростати на неродючих ґрунтах та толерантність до посухи.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячена означена стаття. У дослідженні наводиться схема зеленої мережі, проаналізовано таксономічні показники та віталітетний стан деревних насаджень вулиць, які поєднують зелені масиви лівобережжя міста Дніпро, що раніше не підлягало аналізу.

Новизна. Вперше для лівобережної частини м. Дніпро розроблено систему «зеленого каркасу» та спроектовано «зелені коридори», проаналізовано таксономічний склад, життєвий стан деревних рослин, які їх складають.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження була розробка зеленого коридору з вулиць, які утворюють каркас, з'єднуючи парки лівобережжя м. Дніпро.

Предмет дослідження: видовий склад, віталітетний стан деревних насаджень вулиць, що обрані як «зелені коридори» і поєднують зелені масиви лівобережжя м. Дніпро.

Мета даної роботи – спланувати зелений каркас лівобережжя м. Дніпро, проаналізувати насадження запропонованих «зелених коридорів» у лівобереж-

ній частині міста; визначити різноманіття та якісний стан їх деревних рослин.

Методологічне або загальнонаукове значення. Дослідження має важливе методологічне значення, оскільки базується на комплексному підході до формування зеленої інфраструктури міста з використанням просторового аналізу та принципів збалансованого розвитку. Загальнонаукове значення полягає у розвитку теоретичних положень щодо ролі зелених коридорів у забезпеченні екологічної стійкості урбанізованих територій та вдосконаленні підходів до просторової організації міського озеленення.

Методи досліджень. Інвентаризацію насаджень проводили згідно [17]. Видовий склад вуличних насаджень встановлювали маршрутним методом, визначення рослин проводили за [18; 19]. Життєвий стан класифікували за шкалою Х.Г. Якубова [20].

Виклад основного матеріалу. Суттєвими за площею зеленими об'єктами з протилежних сторін лівобережної частини м. Дніпро є на північному сході лісопарк «Дружби народів» та урочище «Дніпровські піски» на південному заході. Вони є основними вузлами зеленого каркасу і повинні поєднуватися з іншими міськими насадженнями. Такими елементами є парки та сквери. Проте їх чисельність та загальна площа є недостатньою для такого промислового міста як Дніпро. Усі великі та менші за розміром вузли об'єднуються в єдиний зелений каркас із застосуванням «зелених коридорів» – насаджень вздовж проїзних шляхів вулиць.

Урочище «Дніпровські піски» відноситься до Обухівського лісництва. Найближчим до нього рекреаційним об'єктом є сквер «Амурський парк». Спроекувати прямий шлях, за допомогою якого поєдналися б ці два об'єкти, немає змоги, тому «зеле-

ний коридор» складатиметься з декількох вулиць, а саме: урочище «Дніпровські піски» → Донецьке шосе → поворот на вул. Передову → вул. Передова → вул. Вітчизняна → сквер «Амурський парк». Довжина зазначеного «зеленого коридору» становить 3,8 км (рис. 1).

Видовий склад насаджень необхідної ділянки Донецького шосе презентований переважно *Populus simonii* Carriere – 99 шт. або 41,6 % від загальної кількості рослин, та *Platanus acerifolia* Willd. – майже 24,0 % (57 шт.). Кількості інших видів не перевищує 10 шт., за винятком *Spiraea vanhouttei* Zab. (21 шт., 8,8 %). Зростають пооднокі екземпляри *Pinus nigra* Arn., *Ulmus pumila* L., *Tilia cordata* Mill., *Salix matsudana* Koidz., *Picea pungens* Engelm. Усього на дослідній ділянці визначено 21 вид рослин з 12 родин (238 екз.), з них 14 видів дерев і 7 кущів. Аналіз віталітетного стану деревної рослинності вул. Донецьке шосе свідчить, що найбільше рослин відносяться до помірно ослаблених (103 шт. або 43,28 %) та середньо ослаблених (81 шт. і 34,03 %). Серед них у більшості *P. simonii* та *P. acerifolia*. Вони мають сухі гілки, пошкодження кори, морозобоїни. Серед екземплярів *P. acerifolia*, *Betula pendula* Roth. та *S. vanhouttei* є і рослини без ознак ослаблення – 9,24 % від загального обсягу рослин. Виявлено 5 сухостійних дерев поточного року (2,1 %) та 7 екз. – минулих років (6,3 %). Це *Acer saccharinum* L., *P. acerifolia* та кронаваних *P. simonii*.

Біля з'їзду з Кайдацького мосту автошлях оточений з усіх боків озеленою набережною каналу. Справа від шосе розташована автозаправочна станція, на придорожній ділянці якої зростають *B. pendula*, *S. matsudana*, група хвойників (*Juniperus sabina* L., *Thuja occidentalis* L., *P. nigra*), кущами та

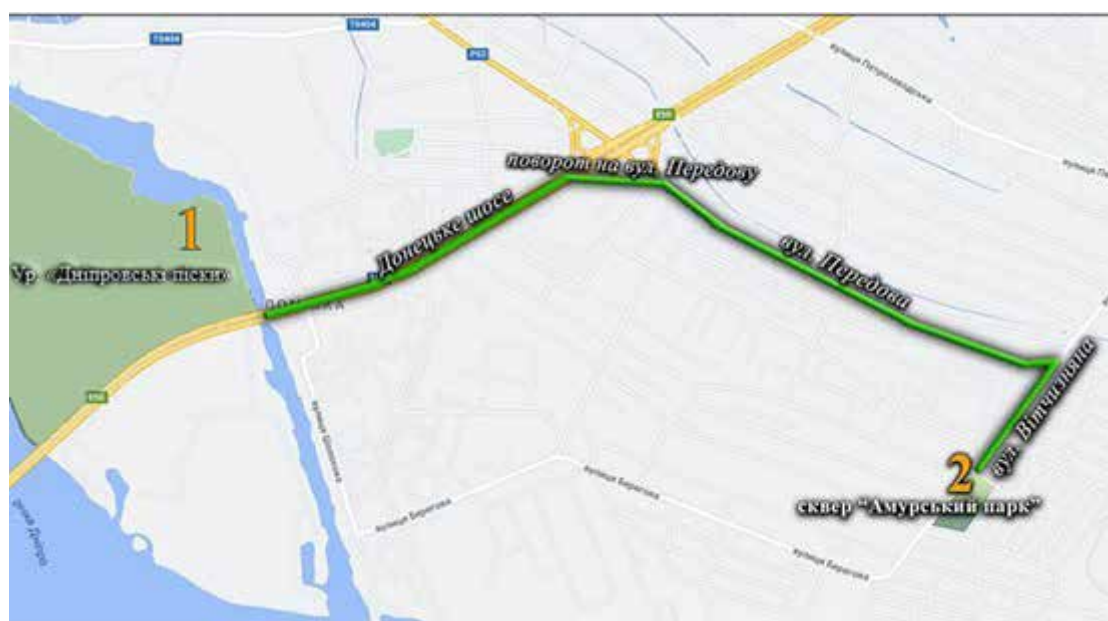


Рис. 1. Схема проектування «зеленого коридору» між урочищем «Дніпровські піски» та сквером «Амурський парк»

квітковими багаторічниками у доброму життєвому стані. У свої часи ділянка Донецького шосе, яка є частиною «зеленого коридору», була засаджена рядами *P. simonii*, з часом частина дерев загинула через несприятливі умови або видалена під час будівництва. Перериває «зелений коридор» торгівельна зона вкрита асфальтом та плиткою протяжністю біля 320 м. Між павільйонами встановлені 5 контейнерів з *T. occidentalis* 'Smaragd', проте цього замало. Пропонується застосувати модульні квітники біля торгівельних павільйонів, в'юнкі рослини та збільшити кількість контейнерів. Далі зафіксовано 6 кронуваних сухостоїв *P. simonii*. Інші екземпляри цього виду знаходяться у задовільному стані, вони характеризуються певним відсотком сухих гілок, які необхідно видалити. Серед патологій стовбура відмічено морозобійни, механічні пошкодження, дупла, багатостовбурність тощо. Ці насадження поступово оновлюють через заміну молодими рослинами *P. acerifolia*. Вони мають задовільний стан, проте потребують догляду.

З лівого боку шосе розташований заклад харчування, територія якого добре озеленена, після якого зростає 5 екз. *P. simonii* та 3 екз. *P. acerifolia*, і надалі коридор переривається побутовими закладами. Їх можна оздобити за допомогою контейнерного озеленення з використанням *T. occidentalis*, *Buxus sempervirens* L., *Pelargonium zonale*, кашпо з *Hedera helix* L., *Petunia* × *hybrida* hort. тощо. Після цих закладів ряд продовжується дорослими особинами *P. simonii* та молодими посадками *P. acerifolia*. Вздовж лівої проїжджої частини шосе до житлової забудови проходить ще один атошлях. На ділянці між майданчиком для паркування та вул. Зіновія Матли зростають *Armeniaca vulgaris* Lam. (2 екз.), *A. saccharinum* (1 екз.), *P. simonii* з домішками *R. pseudoacacia* та *T. cordata*, *Amorpha fruticosa* L. Озеленення ділянки дороги від зупинки «вул. Зіновія Матли» до зупинки «вул. Вишнева» виконано саджанцями *A. saccharinum* (7 шт., з них 5 – свіжий сухостій), *A. platanoides* L. (1 шт.), *T. platyphyllos* Scop. (2 шт.), *Spiraea vanhouttei* Zab. у вигляді солітерів та груп (біля 20 екз.), групою з 11 екз. *P. simonii*. Дещо в бік від зупинки «вул. Вишнева» на тлі газону висаджено 25 екз. *P. acerifolia* у вигляді рядової посадки. Кінцевою точкою ділянки є магазин будівельних матеріалів, навколо якого нараховано 4 екз. *Aesculus hippocastanum* L., трав'янисті багаторічники, за поворотом на вул. Славгородську сформована група з 4 екз. *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle та 1 екз. *B. pendula*.

Наступною частиною «зеленого коридору» є поворот на вул. Передову. Її довжина складає 0,3 км, вона з'єднує Донецьке шосе із вул. Передовою. Перша його половина це ще Донецьке шосе, а друга – провулок Бучанський. Ширина проїжджої частини біля 6 м, рух автотранспорту односторонній. Насадження, які тут зростають на тлі трав'яного

покриву, скоріше за все природного походження, безструктурні, що дозволяє зробити висновок, що цілеспрямовано ця ділянка ніколи не озеленювалася. Тут виявлено 32 екз. рослин, які належать до 11 видів з 8 родин, половина з них є представниками роду *Ulmus*: 11 екз. *Ulmus pumila* L. та 5 екз. *U. laevis* Pall. Поодинокі зростають *Catalpa bignonioides* Walt., *Juglans regia* L., *A. vulgaris*, *Prunus divaricate* Ledeb. та *A. negundo* L. Віталітетний стан цих дерев задовільний: найбільша кількість рослин є середньо ослабленими, найменша – сильно ослабленими, сухостій відсутній.

На другій частині вулиці (зправа), яка прилягає до автомийки, зростають 4 екз. *U. laevis*, більшість з них мультиштамбові. Частина ділянки (пров. Бучанський) знаходиться біля приватної забудови з наявністю озеленення, тому «зелений коридор» тут не переривається і виконує передбачувані функції. Проте можна порекомендувати ввести у насадження невисокі та толерантні до чинників довкілля види кущів у вигляді рядових посадок *J. sabina*, *Thuja orientalis* L., *Tamarix tetrandra* Pall. або *Cotinus coggygria* Scop. З лівого боку розташовані неупорядковані насадження *U. pumila*, *R. pseudoacacia* (3 шт.) самосівного походження, *Morus alba* L. (4 шт.), *Elaeagnus angustifolia* L. (3 шт.); по одній особині *Prunus domestica* L., *Armeniaca vulgaris* Mill., *Prunus divaricate* Ledeb., *Juglans regia* L., а також *Acer negundo* L. та *Catalpa bignonioides* Walt. На цій ділянці слід заповнити порожні місця з використанням асортименту рослин аналогічного як для правої сторони. У центрі трикутних ділянок, між дорогами, можна створити групи з толерантних до несприятливих чинників видів, наприклад, із кущів *T. tetrandra*, а також газо- та посухостійких листяних дерев.

Продовженням «зеленого коридору» є частина вул. Передова, яка має протяжність 1,6 км і починається від перехрестя з Донецьким шосе до вул. Вітчизняної. Ширина проїжджої частини 6 м, має дві смуги руху, вздовж якої зростає 249 рослин з 14 родин та 24 видів. Серед них найбільшу частку становлять *Cerasus vulgaris* Mill. (24,1 %, 60 екз.), *J. regia* (15,26 %, 38 екз.), *R. pseudoacacia* (14,06 %, 35 екз.) та *P. domestica* (12,45 %, 31 екз.). У кількості 0,4 % від сумарної чисельності рослин трапляються поодинокі особини *Sambucus nigra* L., *Ulmus laevis* Pall., *Populus bolleana* Louche та *P. nigra* L., *Syringa vulgaris* L., *Sorbus* × *intermedia* (Ehrh.) Pers. та *Acer pseudoplatanus* L. Найчисельнішими є рослини у середньо ослабленому стані – близько 43,0 % від усієї кількості, 30,5 % – помірно ослаблені, 13,3 % – сильно ослаблені. У наявності 2 екз. свіжого сухостою та 7 екз. сухостою минулих років.

За поворотом з Донецького шосе з правого боку вулиці на ділянці протяжністю 60 м розташовані магазини біля яких немає будь-якого озеленення. Тому тут слід застосувати контейнерну культуру (декоративні форми *Th. occidentalis*, види

р. *Juniperus*, *B. sempervirens*) з метою поліпшення естетичності ділянки і заповнення екологічного пробілу. Біля зупинки транспорту «Сільпо» висаджені групи з *M. alba*, *R. pseudoacacia*, *S. nigra*, *A. vulgaris*, *A. negundo*, а за поворотом на вул. Детальбудівська зростає нещільний ряд з *R. pseudoacacia*, прибудинкове озеленення представлене переважно *C. vulgaris* та *J. regia*. Ці насадження формують різновидовий та нерівномірний «коридор». Екземпляри *R. pseudoacacia* є старовіковими, необхідно провести обрізку представників потенційно аварійних рослин та поступово замінити на молоді дерева. Схоже озеленення встановлено і з протилежного боку вулиці, винятком є її початок, де зростають *T. cordata* (5 шт.) і по 3 шт. *J. regia* й *R. pseudoacacia*. Серед *R. pseudoacacia* 1 екз. є старим сухостоєм і потребує заміни. Біля пров. Таврійський та ветеринарної клініки з обох боків вулиці деревні рослини відсутні на ділянці протяжністю 70 м. Її необхідно заповнити аналогічним асортиментом, що зростає на вулиці, або декоративними та витривалими видами, такими як *Caragana arborescens* Lam. чи *Ulmus scabra* Mill. д.ф. 'Pendula', різноманітними формами *Th. orientalis*, *C. coggryia* «Royal Purple», *Berberis thunbergii* DC. «Golden Ring» і «Red Chief» і т.д. Для трьох суховерхих екземплярів *R. pseudoacacia*, які зростають з лівої сторони, необхідно терміново провести санітарну обрізку. В районі вул. Придніпровської, що перетинає Донецьке шосе, з обох боків на порожніх місцях протяжністю біля 50 м слід висадити деревні рослини. Такі прогалини без рослинності не повністю порушують структуру «зеленого коридору», оскільки за огорожами приватних ділянок є озеленення і це передусім плодові культури. Подекуди виявлені сухостої плодових, а саме *C. vulgaris*, *P. domestica*, *A. vulgaris*, а також *J. regia* з пошкодженнями листків та штамбу ентомошкідниками. Загалом, рослини мають задовільний стан і створюють «зелений коридор». У кінці вулиці, починаючи від перетину з вул. Придніпровською, майже відсутні придорожні насадження окрім кількох дорослих екземплярів *C. vulgaris* та її самосіву з лівого боку. Ця ділянка зі зупинкою та об'єктами соціального призначення значна за протяжністю (150 м). З обох сторін її необхідно озеленити, наприклад, рядовою посадкою *Tilia platyphyllos* Scop.

Останньою частиною «зеленого коридору» між «Дніпровськими пісками» та сквером «Амурський парк» є вул. Вітчизняна довжиною 2,8 км. Як складова «зеленого коридору» обрана ділянка довжиною 0,5 км від перехрестя з вул. Передова та Симиренківська і до Амурського скверу (вул. Крилівська). Її дендрофлора представлена 41 шт. дерев з 8 видів та 4 родин. Переважає *U. scabra* (29,3 %, 12 екз.) та *C. vulgaris* (26,8 %, 11 екз.). За віталітетним станом 36,6 % екземплярів є помірно ослабленими, 29,3 % – середньо ослабленими, по 14,6 % в групах сильно ослаблених та здорових (*U. scabra*).

Будь-який сухостій відсутній. Ця ділянка є однією з найменш озелених серед усіх. Екземпляри *R. pseudoacacia* та *A. negundo* були видалені через аварійність, молоді дерева проте ще не висадили. Із західного боку вулиці зростає живопліт з *U. scabra* (у формі кущів), екземпляр *Amelanchier ovalis* Medik., що відмирає, та *A. vulgaris*, зі східного боку плодові: 11 шт. *C. vulgaris*, 5 – *A. vulgaris*, 3 – *P. domestica*, поросль *M. alba*, а також *U. pumila*. Всі перелічені насадження розташовані «острівцями» серед пустих проміжків. Подекуди трапляються квіти, в'юнки рослини, проте місця для їх розвитку обмаль. Від автодороги до високих парканів приватних забудов з обох боків відстань 2–3 м, тут проходить і пішохідна доріжка. За огорожею відмічено плодові та декоративні дерева, тому роль «зеленого коридору» ця ділянка здатна виконувати. З метою збільшення його ефективності рекомендується вертикальне озеленення огорож *Parthenocissus quinquefolia* Planch., *Hedera helix* L., *Campsis radicans* (L.) Seem., видами роду *Clematis* L., а також посадку компактних дерев та кущів (*Viburnum opulus* L., *Acer campestre* L., *Th. occidentalis*, *Th. orientalis*, *Spiraea vanhouttei* Zab. та ін.).

Наступним зеленим об'єктом від скверу «Амурський парк» є сквер біля БК ТОВ ДМЗ «Комінмет». Проект «зеленого коридору» до цієї локації можна зобразити так: **сквер «Амурський парк» → вул. Вітчизняна → вул. Вільного Козацтва → пров. Василівський → сквер біля БК «ДМЗ Комінмет»** (рис. 2). Його довжина 1,7 км.

До «коридору» включено майже всю частину вул. Вільного Козацтва протяжністю біля 1 км. Її озеленення представлено 148 екз. деревної рослинності (21 вид з 11 родин). Серед них домінує *C. vulgaris* (44,0 %, 65 екз.), часто зустрічається *R. pseudoacacia* (20,0 %, 29 екз.), по одній особині репрезентовані *S. nigra*, *Ulmus laevis* Pall., *Populus nigra* L. та *Populus pyramidalis* Rozier., *Sorbus aucuparia* L., *P. divaricate* 'Pissardii', *Cerasus avium* (L.) Moench, *Rosa canina* L., *Malus domestica* Borkh. та *Rhus typhina* L. 44,6 % насаджень є помірно ослабленими, 32,0 % рослин відносяться до категорії середньо ослаблені. Проте досить багато екземплярів (15,5 %) різних видів деревних рослин не мають ознак ослаблення. Це свідчить про доволі сприятливі умови зростання та здійснення догляду за насадженнями. Цільове озеленення вул. Вільного Козацтва починається з правої сторони за перехрестям з вул. Василя Бабенка. Рядові насадження з 24 екз. *R. pseudoacacia*, з нерівномірними відстанями між екземплярами, з домішками по краях ряду *P. nigra* (1 шт.), *M. alba* (1 шт.), *Betula pendula* Roth. (5 шт.), *U. laevis* (1 шт.) відмежовує завод «Комінмет» від житлової зони. Від початку пров. Весняних Конвалій озеленення відсутнє до кінця вулиці, проте за огорожами приватних будинків та заводу зростають дерева, тому «коридор» істотно не знецінюється. Варто рекомендувати озе-

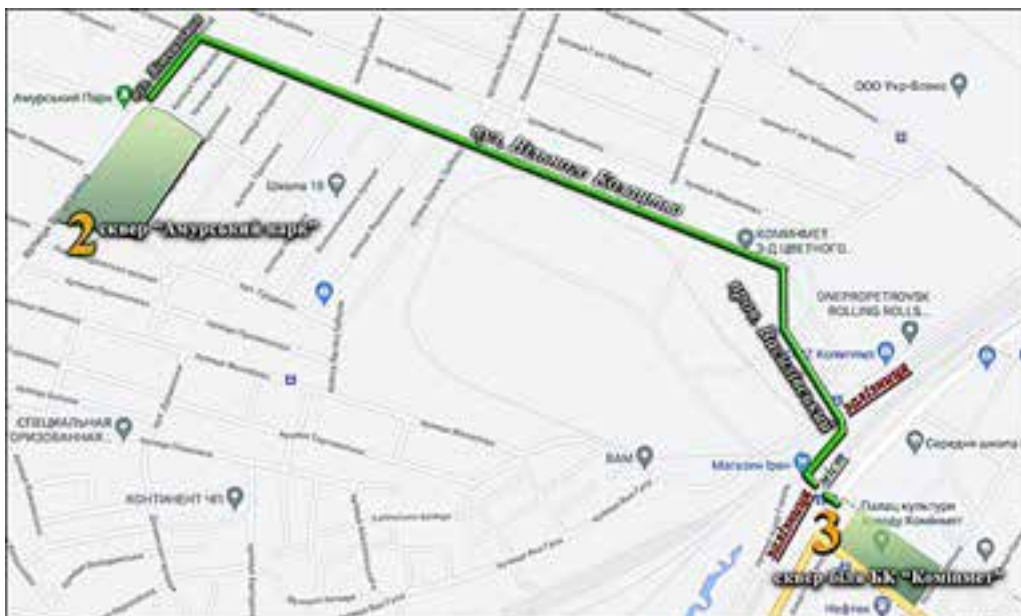


Рис. 2. Схема проекту «зеленого коридору» між сквером «Амурський парк» та сквером біля БК «ДМЗ Комінмет»

ленити ділянки назовні огорож для покращання екологічних умов, підвищення естетичності з використанням *A. pseudoplatanus*, *Platanus orientalis* L., *Sophora japonica* L., *P. divaricate* 'Pissardii' тощо.

Наступна і остаточна ланка цього «зеленого коридору» – **провулок Васи́лівський**. Він є найкращим прикладом якісного «зеленого коридору» через перетин залізничними коліями двічі та розташовання на ньому невеликого ринку. Довжина частини, яка входить до «зеленого коридору» біля 0,5 км, а загальна – 0,8 км. Дендрофлора ділянки складається з 58 екземплярів, що відносяться до 13 видів з 10 родів та 8 родин. Найсуттєвішою у насадженнях є участь *U. pumila* (24,1 %) та *R. pseudoacacia* (19 %), часто трапляється *Acer negundo* (13,8 %), у меншому ступені *P. pyramidalis*, *J. regia*, *M. domestica* та *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle. Близько 47 % рослин є середньо ослабленими, з ознаками помірного та сильного ослаблення – по 22,4 % кожної категорії. Сухостій відсутній. До рослин без ознак ослаблення відносяться лише 2 дерева *U. laevis* (3,45 %).

Західна частина провулку прилягає до підприємства «Комінмет», тому насадження тут наявні лише на її початку. Це 4 екз. *Aesculus hippocastanum* L., та по 1 екз. *R. pseudoacacia*, *A. altissima* і *A. vulgaris*. Далі розташовані будівлі заводу без рослинності поряд. Можна порекомендувати озеленити стіни *H. helix* або *P. quinquefolia*. Зі східного боку сформовані несучільні насадження за огорожею, які є частиною прибудинкового озеленення. У них переважають *R. pseudoacacia*, види р. *Ulmus* та *M. alba*, які зростають мішаним та нерівномірним рядом. Рослини тут переважно ослаблені, потребують догляду, видалення порослі, санітарної обрізки.

Далі шлях проходить перехрестям з вул. Промисловою та Яхненківською до залізничних шляхів довжиною 20 м. На цій ділянці озеленення відсутнє. На шляху «зеленого коридору» розташований ринок протяжністю 90 м. Біля входу до нього зростає група з 3 екз. *Populus simoni* Carr. Він оточений з обох боків рядовими посадками дерев, які продовжують «зелений коридор». Асортимент складається з *P. simoni*, *Ulmus pumila*, *A. negundo*, *R. pseudoacacia*, *M. alba*, *M. domestica*. Дерев зростають на відстані 10 м від колії. Потім шлях прямує перпендикулярно до вул. Каруни і скверу біля БК «Комінмет». Насадження на цій ділянці відсутні, бо вона пролягає крізь надземний перехід через залізничні колії, довжина якого 15 м. Тут можна висадити ліани, а також використати контейнерну культуру.

Сквер біля БК «Комінмет» є локацією поєднання «зелених коридорів» від двох парків, які віддалені майже на однакову відстань. По-перше, слід спроектувати зв'язок із парком «Сагайдак». Це поодинокий випадок у дослідженні, коли «зелений коридор» між 2-ма ділянками прямий і представлений однією вулицею – проспектом Мануйлівським. Схема наступна: **сквер БК «Комінмет» → просп. Мануйлівський → парк «Сагайдак»**. Протяжність «коридору» – 2 км (рис. 3).

Проспект Мануйлівський – магістральна вулиця довжиною 2,4 км, розташована уздовж берега р. Дніпро і об'єднує з'їзди з двох мостів: Амурського (вул. Каруни) та Центрального (просп. Слобожанський).

Вздовж пр. Мануйлівський зростає 319 деревних рослин, які відносяться до 23 видів, 18 родів та 12 родин. Домінують серед них *T. cordata* (12,5 %, 12 екз.), *A. negundo* (10,3 %, 10 екз.), *U. pumila* (10,3 %, 10 екз.), *R. pseudoacacia* (9,7 %, 9 екз.), *A. altissima* (9,7 %, 9 екз.), *A. vulgaris* (9,7 %, 9 екз.), *P. pyramidalis* (9,7 %, 9 екз.), *J. regia* (9,7 %, 9 екз.), *M. domestica* (9,7 %, 9 екз.), *Ailanthus altissima* (9,7 %, 9 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia* (3,45 %, 3 екз.), *M. domestica* (3,45 %, 3 екз.), *Ailanthus altissima* (3,45 %, 3 екз.), *U. laevis* (3,45 %, 3 екз.), *U. pumila* (3,45 %, 3 екз.), *R. pseudoacacia* (3,45 %, 3 екз.), *A. altissima* (3,45 %, 3 екз.), *A. vulgaris* (3,45 %, 3 екз.), *P. pyramidalis* (3,45 %, 3 екз.), *J. regia*

40 екз.), *R. pseudoacacia* (11,6 %, 37 екз.), *Populus bolleana* Louche (10,7 %, 34 екз.). Багато особин *S. vanhouttei* (10 %, 32 екз.), *U. pumila* та *J. regia* (по 9 %, 29 екз.). Найменше у насадженнях представлені *P. pyramidalis*, *S. vulgaris*, *Pyrus communis* L. (по 1 екз.). За життєвим станом переважають середньо ослаблені особини (47,3 %, 151 шт.), сильно ослаблених – 18,8 % (60 екз.). У наявності 13 сухостоїв (4,1 %), які слід видалити та замінити на молоді дерева. Частка непошкоджених рослин – 20,4 % або 65 екз. У цій групі близько половини особин відносяться до *S. vanhouttei* (32 екз.).

Смуги рослин дослідженої ділянки часто прериваються через загибель дерев. Південному боку вулиці переважно властиві незасаджені ділянки. Починаючи зі з'їзду з Амурського мосту до вул. Брандиса насадження не мають впорядкованої структури і розташовані подекуди у вигляді груп, наприклад, біля автозаправки, у якості прибудинкового озеленення (3 екз. *B. pendula*, молоді посадки *Fraxinus pennsylvanica* Marsh., жива огорожа з *S. vanhouttei* тощо, одиничні екземпляри *P. nigra* та залишки *R. pseudoacacia*, самосів *A. altissima* та *A. negundo*). Необхідно підвищити естетичність цього деревостану, видалити поросль, а на численні порожні ділянки висадити рослини, які толерантні до піщаних ґрунтів. Можна запропонувати такі схеми: ряд із *Pinus nigra* Arn., як чагарникових ярус – *J. sabina*, *Elaeagnus angustifolia* L., *Caragana arborescens* і *Amorpha fruticosa* L. почергово; нещільний ряд із *Gleditsia triacanthos* L., між деревами – групи з *Rosa rugosa* Thunb. На протилежному боці проспекту нещодавно були висаджені *T. cordata* та *T. platyphyllos*, але їх стан незадовільний, багато рослин відмирають. Їх слід забезпечити регулярним доглядом, особливо протягом вегета-

ції, оскільки вони зростають у лунках в асфальті поряд з автошляхами з активним рухом транспорту. Є й порожні лунки внаслідок відпаду рослин. У лунках також зростають екземпляри *J. regia* у переважно незадовільному стані. Особини *R. pseudoacacia* мають добрий стан, проте іноді зафіксовано патології штамбу та сухі гілки. Слід з часом замінити асортимент придорожніх насаджень просп. Мануйлівський на толерантні до посухи та міських умов види: *G. triacanthos*, *S. japonica*, *R. pseudoacacia*; із чагарників – *C. arborescens*, *C. coggygia*, *T. tetrandra*, *Th. orientalis*, види р. *Juniperus*. Як варіант, це можуть бути полівидові посадки, або дерева одного виду, групи яких з 3–5–10 екз. чергуються, або можна змінювати породу після кожного перехрестя. Після перетину з вул. Брандиса, наближаючись до парку «Сагайдак», насадження стають більш декоративними і функціональними, оскільки до них додаються: з лівого боку – озеленення біля багатоповерхівок, лікарень (№ 1 та 9), АНД районної ради та стадіону заводу «ДМЗ Комінмет», невеличкий сквер біля Храму Преподобного Серафима Саровського; з правого боку проспекту розташовані приватні ділянки з насадженнями. Після перехрестя з вул. Конотопською, зліва зростає ряд дерев з домінуванням *U. pumila*, на яких зафіксовано капи. Далі з обох боків подекуди зростають старі особини *R. pseudoacacia* у лунках та без них, деякі екземпляри потребують заміни, через втрату декоративності та наближення до аварійного стану. Озеленення зазначеної ділянки до зупинки громадського транспорту «Парк «Сагайдак»» слід оновити з використанням запропонованих вище рекомендацій.

Наступна частина «зеленого коридору» розташована між сквером БК «Комінмет» та парком



Рис. 3. Схема проектування «зеленого коридору» між сквером біля БК «ДМЗ Комінмет» та парком «Сагайдак»

«Козацької Слави – Кирилівка». Ділянка пряма і складається з однієї вул. Каруни, проте для проходу в сам парк необхідно використати фрагмент вул. Енеїди. Схема отримує наступний вигляд: **сквер БК «Комінмет» → вул. Каруни → вул. Енеїди → парк «Козацької Слави – Кирилівка»**. Довжина «коридору» складає 1,4 км (рис. 4).

На вул. Каруни зростає 26 видів деревних рослин з 13 родин у кількості 121 екз. Найчастіше трапляються *R. pseudoacacia* (13,2 %), *U. pumila* (9,9 %), *M. alba* (9,9 %), *P. bolleana*, *C. vulgaris*, *A. hippocastanum* (по 8,3 % кожного виду). В одиничних екземплярах зростають *Ribes nigrum* L., *P. nigra*, *T. cordata*, *F. pennsylvanica*, *R. canina*, *Acer platanoides* L. та *A. altissima*. Віталітетний стан рослин переважно ослаблений (40,5 %), біля 29,0 % рослин є помірно ослабленими, здорових рослин 6,6 %. Виявлено 1 свіжий сухостій.

Ділянку на вул. Каруни не можна віднести до повноцінного «зеленого коридору», але вона є єдиним коротким шляхом між об'єктами. Її північно-західна сторона від Амурського мосту практично не озеленена бо межує з трамвайними шляхами (протяжність біля 10 м), далі з теплотрасою та залізничними коліями. Отже, звичайні насадження тут недоречні. Між теплотрасою та залізничними шляхами утворилася поросль та самосів *R. pseudoacacia*, *A. negundo*, *A. altissima*, *M. alba*, *U. pumila*, місцями *P. quinquefolia*. З існуючої рослинності можна сформувати зелену смугу, проте постійно слід контролювати їхній ріст та проводити своєчасну обрізку. Тому варто посадити низькорослі кущі, які мають стійкість до несприятливих умов міського середовища, а саме: *J. sabina*, *Juniperus horizontalis* Moench,

Mahonia aquifolium Nutt., *Symphoricarpos albus* Blake, *Cotoneaster horizontalis* Decaisne.

На перетині з вул. Конотопською теплотраса переходить на вул. Яхненківську. Тут відмічено 11 екз. *M. alba* та 1 екз. *U. pumila*, висотою 5–6 м. З протилежного боку вул. Каруни достатньо озеленена, проте насадження не характеризуються високим рівнем віталітетності та естетичності. «Коридор» розпочинається з майданчика перед пам'ятником, а насадження утворені двома літніми *P. pyramidalis* та рядом *R. pseudoacacia* (6 шт.). Їх стан середньоослаблений (суховерхість, викривлення штамбу). Далі зростають по 1 екз. *A. hippocastanum*, *A. negundo*, *T. cordata*, 2 екз. *C. bignonioides*, живопліт зі *S. vanhouttei*. У бік від вулиці розташована гімназія № 26 з типовим озелененням, що є додатковою підтримкою «зеленого коридору». Насадження вулиці продовжують особини *A. pseudoplatanus* (3 шт.), *A. platanoides* (1 шт.), *U. laevis* (2 шт.), *R. pseudoacacia* (2 шт.). Перед будинком по ходу коридору (біля бібліотеки) розбиті квітники з кущами *R. canina* та *F. pennsylvanica*. На газонній смузі біля проїздної частини зростають 6 екз. *A. hippocastanum*. Далі «коридор» переривається на 50 м мережею магазинів. Ці прогалини рекомендується заповнити *A. platanoides* 'Globosa', або плакучими декоративними формами *B. pendula* або *M. alba*, місця для паркування можна озеленити контейнерною культурою *Th. occidentalis* 'Smaragd'. Насадження продовжують 7 шт. дерев *R. pseudoacacia*, а далі простежується прибудинкове озеленення у вигляді прямокутних палісадників у кількості 9 шт. Їх асортимент складається як з декоративних, так і плодово-ягідних рослин.



Рис. 4. Схема проектування «зеленого коридору» між сквером біля БК «Комінмет» та парком «Козацької слави – Кирилівка»

Від вул. Заплавна посадки перериваються через СТО, магазин з парковкою. Поруч знаходиться опора ЛЕП, біля неї дерева видалені. Тут можна створити групові посадки декоративних кущів (*M. aquifolium*, *Th. occidentalis*, *Euonymus fortunei* (Turcz.) Hand.-Mazz.), а також застосувати вертикальне озеленення огорож з використанням *P. quinquefolia*, *H. helix*, *C. radicans*, виткі сорти р. *Rosa*. Біля ще однієї СТО також доречно вертикальне озеленення, або живопліт із *B. sempervirens* чи *B. thunbergii* 'Erecta'. Далі озелененню 15 м дороги заважає надземний міст через залізничну колію і виїзд з вул. Каруни на Янтарну. У кінці цієї ділянки зростає група з *P. nigra*, *F. pennsylvanica* та *A. platanoides* (загалом 7 шт.), що є частиною озеленення «Центру екстреної медичної допомоги та медицини катастроф».

Друга частина «зеленого коридору» – вул. Енеїди, її невелика ділянка протяжністю 270 м. Тут виявлено лише 23 рослини, які відносяться до 6 видів: 9 екз. – *U. pumila*, 7 екз. – *M. alba*, 1 екз. – *Fraxinus excelsior* L. За життєвим станом помірно- та середньо ослаблені рослини презентовані порівну – по 9 екз., неослаблених 3 екз. (13 %). Сухостій відсутній. З правого боку розташовані нерівномірні посадки: 7 екз. *U. pumila*, 2 – *M. alba*, 2 – *Th. orientalis*, 2 – *Salix alba* L., 2 – *P. simonii* та *F. excelsior*, з лівого – 5 шт. *M. alba* та 2 шт. *U. pumila*. «Коридор» не повністю відповідає вимогам, його шлях проходить через перехрестя та пішохідний перехід.

Тепер слід об'єднати парк «Козацької слави – Кирилівка» зі сквером Масима Семенова. Напряму це здійснити неможливо. Найкоротшим шляхом є вулиці навколо Дніпровського вагоноремонтного заводу із заходу. Можливо запропонувати схему

«зеленого коридору»: • парк «Козацької слави – Кирилівка» → вул. Енеїди → вул. Яхненківська → вул. Універсальна → пров. Універсальний → • сквер Максима Семенова. Довжина такого «коридору» 1,8 км. Він починається описаною ділянкою вул. Енеїди. Нею ми повертаємося на перетин з вул. Каруни, для того щоб потрапити на вул. Яхненківську через залізничні колії з пішохідним переходом (рис. 5).

Вул. Яхненківська є промисловою вулицею зі загальною протяжністю 1,6 км. З метою створення «зеленого коридору» слід використати її частину протяжністю 280 м до початку вул. Універсальної. Тут зростає 8 видів рослин з 3 родин. Домінує серед них родина *Salicaceae* (56 % усіх рослин), а серед порід – *P. bolleana* (40,7 %, 22 екз.). Зафіксовано 1 екз. *A. platanoides* (1,9 %). Найбільше дерев є помірно ослабленими (39,0 %), по 13,1 % рослин без ознак ослаблення та середньо ослаблені. Наявні 3 сухостої, які вимагають видалення (2 екз. *P. bolleana* та 1 екз. *A. pseudoplatanus*). Права частина, що дотична до залізничної колії, озеленена рівномірною рядовою посадкою *P. bolleana* (22 шт.) з домішками *P. pyramidalis* (4 шт.), *S. alba* (2 шт.), *P. simonii* (1 шт.) та *A. platanoides* (1 шт.). Стан дерев здебільшого задовільний, але є 2 сухостої, які слід видалити і насадження поповнити молодими рослинами. Ліва частина починається *P. simonii*, кронаваною *S. alba* похилого віку, а також захаращеною групою *A. negundo*. Далі рядові насадження змінюються на прибудинкове озеленення. Біля дороги у ряд зростають молоді особини *A. pseudoplatanus* (10 шт.) та *P. domestica* (6 шт.). Вони знаходяться у доброму життєвому стані.

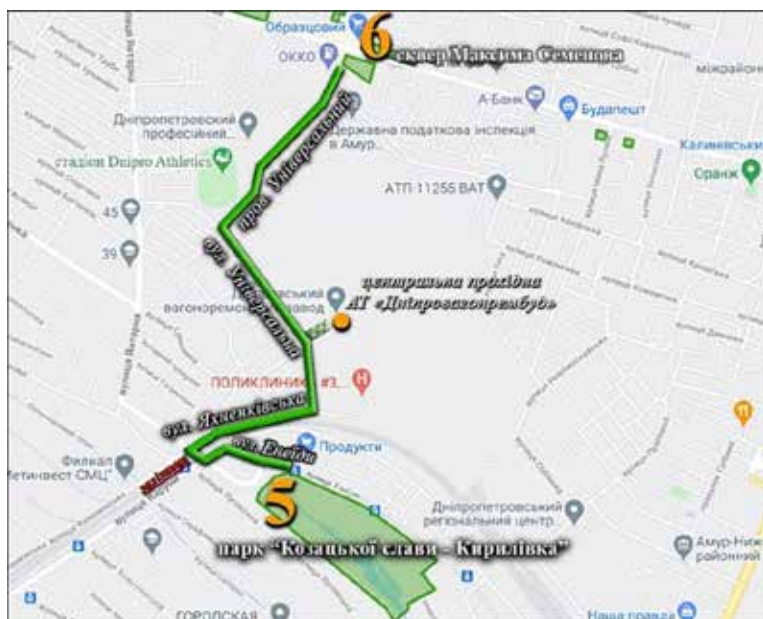


Рис. 5. Схема проєктування «зеленого коридору» між парком «Козацької слави – Кирилівка» та сквером М. Семенова

Наступна ділянка «зеленого каркасу» це вул. Універсальна та пров. Універсальний. Для проектування «зеленого коридору» використана перша половина вул. Універсальна протяжністю 0,68 км до пров. Універсального, довжина якого 0,7 км і він повністю входить до складу «коридору». На вказаних ділянках зростає 210 рослин, що відносяться до 14 видів та 10 родин. Переважає *P. pyramidalis* (34,7 %, 73 екз.), *T. cordata* (23,8 %, 50 екз.), *P. bolleana* (21,9 %, 46 екз.). Зустрічаються поодинокі особини *S. alba*, *Swida sanguinea* (L.) Michx., *Catalpa bignonioides* та *M. alba*. Віталітетний стан здебільшого добрий: 46 % рослин є середньо ослабленими, 38,0 % помірно ослабленими.

Праворуч від початку вул. Універсальної насадження зростають за огорожею і є територією медичного закладу, а далі дошкільного, проте вони також виконують функцію «зеленого коридору». Це дерева *A. negundo*, *P. simonii*, *P. bolleana*, *P. nigra*, *S. alba*, *T. cordata*, *S. aucuparia*, кущі *Spiraea media* Schmidt, ліана *P. quinquefolia*. Біля АТ «Дніпровагонрембуд» розбито невеликий сквер. Зправа на пров. Універсальний висаджений ряд з *P. pyramidalis* у кількості 49 шт., по 1 шт. *P. bolleana* та *P. simonii*. Ряд нерівномірний і часом переривається двічі на 30 м та двічі на 10 м. Ці прогалини можна заповнити молодими деревами *P. pyramidalis* або *P. simonii* з часом замінити цей ряд іншими декоративними рослинами, такими як *A. pseudoplatanus* та *F. excelsior*. Насадження в цілому характеризуються задовільним станом, без сухоостою. Необхідно провести санітарну обрізку та омолодити дерева із сухими верхівками (4 шт.). З лівого боку біля вул. Яхненківської сформовано ряд молодих *A. pseudoplatanus* (5 шт.). Надалі «зелений коридор» продовжує прибудинкове озеленення з рядових посадок *T. cordata* (50 шт.). Будь-який сухостій або дерева з сильними ознаками ослаблення відсутні, наявний лише хлороз листків та сухі гілки. Напроти прохідної заводу ряди *T. cordata* змінюються на групи з *B. pendula* (6 шт.) та *U. pumila* (2 шт.). подекуди деревостан доповнюється іншими видами – *J. regia* (5 шт.), *T. tetrandra* і *S. sanguinea*. Протягом усієї вулиці з лівого боку створена смуга з трав'янистим покриттям, її ширина біля 4 м. На ній можна висадити групи декоративних кущів, стійких до загазованості та засолення, що суттєво підвищить естетичність вулиці, проте вона задіяна як стоянка для авто.

Озеленення пров. Універсальний є менш рівномірним. По-перше, на перехресті провулку та вул. Універсальної варто використати контейнерну культуру *Th. occidentalis* 'Smaragd', оскільки посадка рослин тут неможлива через дорожнє покриття і огорожі. За огорожею СЗЗ «Дніпровагонрембуду», а перед нею біля дороги зростають ряди тополь: 1 екз. *P. simonii*, 11 екз. *P. pyramidalis*, 3 екз. *P. bolleana*, які вимагають санітарної обрізки. Далі по «зеленому коридору» знаходиться ветеринарна клініка, територію навколо якої варто озеленити. Були б дореч-

ними групи та живі огорожі з хвойників різних відтінків – *Th. occidentalis*, *Picea pungens* (Moench) Voss. 'Glaucous', *Juniperus scopulorum* Sarg 'Skyrocket', *Pinus mugo* Turra 'Mughus'. Далі на 150 м насадження вулиці прериваються через магазини та автосервіси, тому доречно використати контейнерну культуру *Th. occidentalis* 'Danica', *Spiraea bumalda* Burv., *Picea omorica* (Panc.) 'Karel', *Pinus mugo* 'Mops', *Philadelphus coronarius* L. 'Snowbelle', *Rosa* L., з квітникових – *Hosta* Tratt., *Pelargonium* L'Her., *Petunia* × *hybrida* hort. тощо. Неповдалі зростає по 2 екз. *A. negundo*, *M. alba* та *U. pumila*. Автостоянку, яка знаходиться поруч, відмежовує ряд з 10 шт. *P. bolleana* у задовільному стані. Від вул. В. Тютюнника до скверу М. Семенова рекомендується створити кілька груп з *C. bignonioides*, які будуть віддалені від автошляху і функціонувати більше як прибудинкові. Лівий бік провулку починається біля огорожі стадіону "Dnipro Athletics". Озеленення його периметру не заплановано, але все ж таки доцільно посадка ряду дерев з ажурною кроною, наприклад, *P. acerifolia* та *P. orientalis* Franco, *B. pendula*, *Acer saccharinum* L., або невисокі декоративні форми *A. platanoides*. Поодаль від пров. Універсальний за огорожею розташований Дніпровський професійний залізничний ліцеєм з рядовими посадками *P. bolleana* по периметру території, які можуть бути частиною «зеленого коридору». Це 13 шт. *P. bolleana* та 4 шт. *P. pyramidalis*, дерева радикально омолоджені, проте всі вже добре відновилися. Далі «коридор» перериваються подвір'ям житлової багатоповерхівки. З боків цієї ділянки рекомендується висадити *P. pungens* 'Glaucous', а під'їзну зону оздобити контейнерною кльтурою з *E. fortunei*, *Yucca filamentosa* L., *Cornus alba* L., 'Elegantissima', *Juniperus squamata* Lamb. 'Blue Star'. Після цієї локації покинуті будівлі розривають «зелений коридор» на 80 м. Ця ділянка потребує реконструкції тротуару з лунками для насаджень, тимчасово можна використати контейнерну культуру видів р. *Juniperus* (наприклад, *J. sabina* 'Tamariscifolia'), *B. sempervirens* з подальшим більш досконалим озелененням. Надалі до перетину з вул. Калиною зростає ряд з *P. bolleana* (19 шт.), *P. simonii* (8 шт.) та *P. pyramidalis* (9 шт.). Їх стан є задовільним, але зустрічаються сухі гілки, морозобоїни та механічні пошкодження кори. Завершує ряд *C. bignonioides*.

Тепер необхідно доєднати до вже спроектованих насаджень «зелених коридорів» лісопарк «Дружби народів». Для цього сполучаємо його зі сквером Максима Семенова так: ● сквер **Максима Семенова** → вул. **Академіка Образцова** → вул. **В. Сухомлинського** → пр. **Слобожанський** → ● лісопарк «Дружби народів» (рис. 6). Довжина «коридору» складає 4 км і проходить він територією Індустріального району.

Уся протяжність вул. Академіка Образцова (2,1 км) є «зеленим коридором». На ділянці зро-

стає 460 екз. деревних рослин, що репрезентовані 48 видами і 18 родинами. Асортимент дерев вулиці є найрізноманітнішим з усіх досліджених локацій. Домінує *C. vulgaris*, чисельність якої 105 шт. (22,8 % усіх рослин). Часто трапляється *S. media* (11,3 %), *A. vulgaris* (7,2 %), *J. regia* (5,7 %), *B. pendula* (5,4 %). Багато видів представлені поодинокими екземплярами (*S. nigra*, *E. fortunei*, *Salix matsudana* Koidz., *Forsythia suspensa* Vahl., *Crataegus monogyna* Jacq. та ін.). Віталітетний стан рослин переважно добрий: 43 % насаджень помірно ослаблені, 30 % середньо ослаблені, 16,5 % не мають ознак ослаблення. У наявності сухостій минулих років – 2 шт. *B. pendula* та 1 шт. *R. rugosa*.

З обох боків вулиці протяжністю 100 м розташовуються торговельні павільйони. Біля ринку в якості озеленення між торговельними МАФами є саджанці *P. acerifolia* у лунках, але насадження вздовж вулиці відсутні, тут слід створити контейнерне озеленення навколо магазинів та кав'ярень. У контейнери рекомендується висадити як кущі (*Th. occidentalis*, *J. sabina*, *Juniperus chinensis* L., *B. sempervirens*, *E. fortunei*, *B. thunbergii*, *Spiraea japonica* L.), так і квіткові рослини (*P. × hybrida*, *Tagetes patula* Janie, *Portulaca grandiflora* Hook., *P. zonale*, *Begonia semperflorens* Hybrids). Далі розташовуються житлові квартали багатоповерхівок, які мають прибудинкове та придорожнє озеленення. З лівого боку знаходиться міні-сквер, оточений невисокою огорожею, з багатим асортиментом декоративних рослин, які відрізняються кольором листків та хвої, габітусом та ажурністю крони. Цей об'єкт істотно підвищує якість «зеленого коридору».

Насадження вздовж проїжджої частини представлені рядом *P. Bolleana* (8 шт.), а ближче до будівель –

групами з *A. platanoides* (5 шт.) та *A. hippocastanum* (3 шт.). Через дорогу нерівномірно зростають 6 екз. *P. pyramidalis*. Надалі частина «коридору» проходить крізь приватний сектор. З протилежного боку понад автошляху знаходиться 2-рядна посадка дерев. Породи чергуються одна з одною, є плодові (5 шт. *M. alba* та 2 шт. *A. vulgaris*). Група з *T. platyphyllos* (3 шт.) зростає між *P. simonii* та групою з *B. pendula*. Тополи розташовані близько біля будинків. Всього їх 16 екз. з переважанням *P. simonii*. Біля дороги зростає 4 екз. *A. hippocastanum* та декілька *B. pendula*, одна з яких є свіжим сухостоєм. Віталітетний стан дерев задовільний, проте насадження старі і вимагають поступової заміни. Слід видалити 2 екз. сухостою *B. pendula*, омолодити дерева з сухими верхівками. Поширеною патологією серед зазначених насаджень є нахил стовбура, що пов'язано з нерівномірним освітленням. Тому при заміні насаджень краще висаджувати тіньовитривалі породи: *P. pungens* та *P. omorica*, *Taxus baccata* L., *M. aquifolium* та види кленів: *A. campestre*, *A. platanoides* та *A. saccharinum*, *S. aucuparia*.

Наприкінці житлової забудови з правого боку знаходиться ще один міні-сквер відділений від дороги порожньою прямокутною ділянкою. На ній рекомендується створити насадження розширивши вже існуючий сквер. З цього ж боку розташована ділянка для паркування авто протяжністю 100 м з незначним видовим різноманіттям дерев: 2 екз. *F. pennsylvanica*, *Padus avium* Mill., *S. aucuparia*, *A. altissima* та групи з *J. sabina*. Рекомендовано застосувати вертикальне озеленення *P. quinquefolia* біля огорожі, перед ним створити живопліт з *Th. orientalis*, між ними – групи з *J. sabina* або *J. horizontalis*. Решта вул. Академіка



Рис. 6. Схема проєктування «зеленого коридору» між сквером Максима Семенова та лісопарком «Дружби народів»

Образцова не має цілеспрямованого озеленення, його формують рослини приватних ділянок: з плодових і горіхоплідних *C. vulgaris*, *A. vulgaris*, *P. domestica* та *J. regia*, з декоративних *S. matsudana*, *E. fortunei*, *B. thunbergii*, *Ph. coronarius*, *A. platanoides* 'Globosum'. Проте ця ділянка «зеленого коридору» є найкраще озелененою, як за асортиментом, так і за віталітетним станом. Ділянок без рослинності майже не спостерігалось, окрім декількох будинків та локацій де ведеться будівництво, але тут функцію беруть на себе насадження біля будинків.

Наступною частиною «зеленого коридору» є **вул. Василя Сухомлинського** довжиною 2,3 км. Для його проєктування використана частина довжиною 1,5 км. На цій ділянці зростає 303 екз. рослин, які відносяться до 27 видів, 22 родів та 14 родин. Найпредставленішим є *B. sempervirens*, який утворює живопліт з 85 екз. (28 % від усіх рослин). З дерев домінують *U. pumila* (13,2 %), *P. simonii* (12,9 %), а також *C. vulgaris* (9,9 %). Поодинокі зростають *R. pseudoacacia*, *Quercus robur* L., *S. aucuparia* (по 0,33 %). Віталітетний стан у багатьох рослин середньо ослаблений (58,8 %), 24,8 % є помірно ослабленими, здоровими виявилися 7,6 % насаджень.

За поворотом з вул. Академіка Образцова розташована автозаправка з придорожнім насадженням *J. sabina* (10 шт.), 1 екз. *T. cordata* та 4 екз. *P. simonii*. Наступна ділянка «коридору» потяжністю 35 м передбачає контейнерне озеленення (*J. scopulorum* 'Skyrocket'), оскільки на ній розташована автомийка та заклад харчування. Лівий бік озеленений рядовою посадкою *P. simonii* (35 шт.), іноді змішуючись з *T. platyphyllos*, *U. pumila*, *A. platanoides*. Дерев зростають нерівномірно передусім внаслідок їх часткової загибелі, тому можна висадити саджанці *P. simonii* у проміжки. Протилежний бік дотичний до приватної забудови, його озеленення виглядає як хаотичне насадження плодових порід (*C. vulgaris*, *A. vulgaris*, *P. domestica*) та видів роду *Ulmus* – *U. pumila* і рідше *U. laevis*.

Біля вул. Павла Громницького після живої огорожі із *B. sempervirens* на ділянці 150 м озеленення взагалі відсутнє через скупчення торговельних і харчових закладів, автопарковки. Тут доцільною буде контейнерна культура з використанням *Th. occidentalis*, *J. scopulorum* та квіткових рослин (*P. zonale*, *B. semperflorens* тощо). З правого боку розрив у насадженнях продовжується низкою майстерень авто-послуг, тому пропонується продовжити контейнерне озеленення, з лівого – «коридор» створюють зелені смуги біля багатоповерхівок. Далі до проспекту Слобожанський розташовані приватні садиби майже без зовнішнього озеленення. Тому тут слід використати огорожі у якості штучних опор для ліан, а також живоплоти з кущів, солітери чи ряди дерев з компактною кроною (плакучі форми *B. pendula*, *M. alba*, *Larix decidua* Mill.; карликові декоративні види роду *Malus* – 'Evereste', 'Dolgo'). Отже, оха-

рактеризована ділянка «коридору» вимагає додаткового озеленення на частині, яка прилягає до просп. Слобожанський, в т.ч. контейнерного.

Об'єднати лісопарк «Дружби народів» зі спроектованим «коридором» слід ділянкою **просп. Слобожанський** довжиною 0,3 км. Протяжність самого проспекту складає 6,3 км. На частині проспекту, яка є «зеленим коридором», зростає 111 рослин, які є представниками 19 видів з 11 родин. Найчисельнішою є *P. pungens* (21,6 %), у меншій кількості зростають *B. pendula* (13,5 %), *C. bignonioides* (14%), *A. hippocastanum* (9,9 %). Поодинокі трапляються *U. laevis*, *S. alba*, *J. regia*, *F. excelsior* та *F. pennsylvanica*, *R. canina*. За віталітетним станом переважають середньо ослаблені рослини (40,5 %), помірно ослаблених у насадженнях близько 30 %, без ознак ослаблення 16,2 % всіх рослин. Сухостій не виявлено.

З правої сторони проспекту перед заправкою слід застосувати контейнерну культуру з *J. sabina*. Далі від проспекту виявлено по 3 екз. *A. platanoides* та *P. pyramidalis*. До автошляху прилягає смуга з трав'янистим покриттям без насаджень, тому тут доречно висадити групи з кущів (*Th. occidentalis* 'Globosa', *S. albus*) та солітерів (*B. pendula* – звичайна або форма 'Pendula'). Декілька особин *P. pyramidalis* переривають порожній простір і знову розташована ділянка з трав'янистим газонним покриттям без рослин, яку варто озеленити згідно вищевказаних рекомендацій, або рядом *C. bignonioides*, групами з *P. pungens*. Далі відмічено групу з *B. pendula*, поодинокі дерева *R. pseudoacacia*, молоду *P. pungens*, а близько лісопарку – групу з *C. bignonioides* (14 шт.). Із західного боку проспекту, біля смт Слобожанське, рослин у 2 рази більше, бо вони є озелененням адміністративних установ та медичного закладу. Ці рослини потребують омолоджувальної обрізки та поступової заміни через поважний вік. Загалом ці насадження спроможні виконувати функцію «зеленого коридору».

З метою завершення мережі «зелених коридорів» та проєктування єдиного каркасу, що не преривається, слід поєднати урочище «Дніпровські піски» та лісопарк «Дружби народів». План виглядає так: **• ур. «Дніпровські піски» → Донецьке шосе → вул. Поштова → вул. Василя Сухомлинського → просп. Слобожанський → • лісопарк «Дружби народів»**. Протяжність «коридору» складає 9 км (рис. 7).

Частина Донецького шосе, яка є ділянкою запроєктованого «коридору», до перехрестя з вул. Передовою описана вище. Проте у даному випадку слід застосувати майже всю вулицю аж до повороту на вул. Поштову, що становить 6,2 км. Загалом насадження Донецького шосе у кількості 671 шт. презентовані 31 видом деревних рослин з 16 родин. Домінують рядові посадки *P. bolleana* і *P. simonii*. Дещо більше третини всіх насаджень (39,6 %) від-

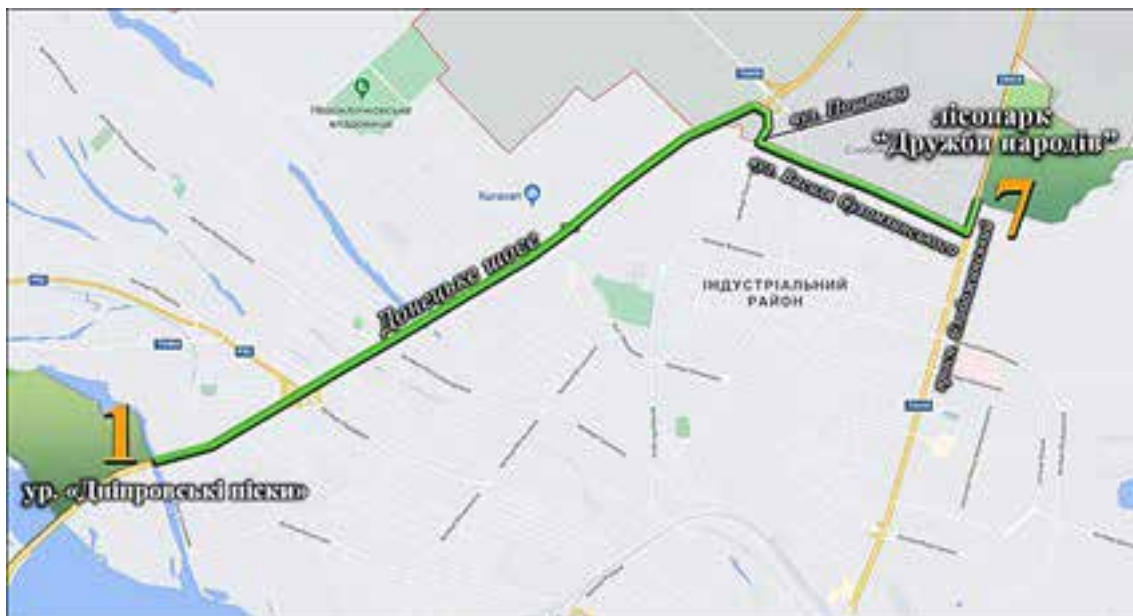


Рис. 7. Схема проектування «зеленого коридору» між урочищем «Дніпровські піски» та лісопарком «Дружби народів»



Рис. 8. «Зелені коридори» в безперервному зеленому каркасі лівобережної частини м. Дніпро

Примітка: 1 – урочище «Дніпровські піски»; 2 – сквер «Амурський парк»; 3 – сквер БК «ДМЗ Комінтет»; 4 – парк «Сагайдак»; 5 – парк «Козацької слави – Кирилівка»; 6 – сквер М. Семенова; 7 – лісопарк «Дружби народів»; а – запроєктований сквер біля «Дніпровагонрембуду»

носяться до середньо ослаблених, незначно менше помірно ослаблених. Серед ушкоджень на деревах спостерігаються морозобійні тріщини, зламані гілки, дупла, що призводить до зниження життєвості деревостану. Рекомендується їх омолоджувальна й санітарна обрізка, заповнення прогалин у рядах молодими екземплярами *P. acerifolia*.

На рис. 8 наведена узагальнена схема проєкту «зеленого каркасу», який створюють озелені

об'єкти лівобережної частини м. Дніпро та спроектовані «зелені коридори». Протяжність цієї мережі коридорів сягає біля 20,5 км. Між лісопарком «Дружби народів» та парком «Сагайдак» такою сполучною ланкою міг би бути проспект Слобожанський, але розрив без рослинності довжиною 600 м з побудованим над залізничними коліями шляхопроводом нажалі виключає таку можливість.

Головні висновки

Досліджена лівобережна частина м. Дніпро складається з 7 зелених зон: урочище «Дніпровські піски», сквер «Амурський парк», сквер біля БК «Комінмет», парк «Сагайдак», парк «Козацької слави – Кирилівка», сквер Євгена Клочка (нині Максима Семенова) та лісопарк «Дружби народів». Їх площа загалом складає 261,4 га.

Зелені насадження обстеженої частини міста не створюють нерозривний зелений каркас, відсутнє центральне ядро, а окремі локації розрізнені у просторі, характеризуються невеликою площею та розподілені по дослідній території нерівномірно. Проте можливо спроектувати мережу «зелених коридорів». Вулиці та проспекти, що на сьогодні сполучають зелені об'єкти у місті, переважно відповідають вимогам для статусу таких «коридорів», хоча деякі їх частини потребують реконструкції і додаткового озеленення, а існуючі вуличні та пришляхові насадження – догляду, заміни та урізноманітнення асортименту.

Інфраструктура лівобережної частини міста є не дуже благоприємною для створення суцільного зеленого каркасу та рівномірної системи озеленення, які б повноцінно виконували передба-

чувальні екологічні функції. Такою перешкодою є залізничні шляхи Придніпровської залізниці, бо саме вони не дають змоги замкнути кільце «зеленого коридору», а отже безрозривно поєднати усі притаманні цій ділянці зелені об'єкти. Лісопарк «Дружби народів» та парк «Сагайдак», які є двома значними за площею зеленими об'єктами, можна було б поєднати напряму ділянкою проспекту Слобожанський, яка характеризується достатньо якісним та різноманітним озелененням. Проте такий «зелений коридор» не може бути спроектований оскільки різко переривається відрізком протяжністю 0,6 км через перетин проспекту надземним мостом, під яким знаходяться залізничні колії. Внаслідок цього зелена мережа лівобережжя міста залишається незамкненою.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати дослідження можуть бути використані у містобудівному та ландшафтному плануванні, практиці озеленення та формуванні зеленої інфраструктури міста, а також при розробці екологічних стратегій і програм озеленення територій. Їх впровадження сприятиме підвищенню екологічної стійкості урбанізованих територій і покращенню якості міського середовища.

Література

1. Кузик І. Теоретико-методологічні засади дослідження комплексної зеленої зони міста. *Наукові записки ТНПУ ім. В. Гнатюка*. Серія: Географія. 2019. № 2 (47). С. 21–32. <https://doi.org/10.25128/2519-4577.19.3.3>
2. Brooker L., Brooker M., Cale P. (1999). Animal dispersal in fragmented habitat: measuring habitat connectivity, corridor use, and dispersal mortality. *Conservation Ecology*. Vol. 3(1): 4. URL: <http://www.consecol.org/vol3/iss1/art4/>
3. Beier P., Majka D., Jenness J. (2007). Designing wildlife corridors with ArcGIS. Watsonville, CA. 105 p.
4. Jongman R.H.G., Küllvik G.M. et al. European ecological networks and greenways. *Landscape and Urban Planning*. 2004. V. 68. N 2-3. P. 305-319. DOI:10.1016/S0169-2046(03)00163-4
5. Савицька О.С., Румілець Т.С., Кур'ян В.В. Архітектурно-містобудівні та соціально-економічні передумови формування зеленої інфраструктури. *Регіональні проблеми архітектури та містобудування*. 2020. № 14. С. 31–40. DOI: 10.31650/2707-403X-2020-14-31-40
6. Bennett A.F. (2003). Linkages in the landscape: the role of corridors and connectivity in wildlife conservation. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK. 254 pp.
7. Бессонова В. П., Іванченко О. Є. Зелена мережа правобережжя міста Дніпро. *Екологічні науки*. 2020. Вип. 1 (28). С. 235–245. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.1-28.37>.
8. Herman R. Green Roofs in Germany: Yesterday, Today and Tomorrow. Proceeding of the dgeen Roof tops for Sustainable Communities Symposium. Hosted by: Green Roofs for Halthy Cities and City of Portland, Oregon. Vay, 29–30, 2003.
9. Haase D., Schwarz N., Strohbach M. et al. Sinergies, Trade-offs and Losses of Ecosystem Services in Urban Regions: an Integrated Multiscale Framework. Applied to the Leipzig-Halle Region, Germany. *Ecology and Society*, 2012. V. 17 (3). Ph. 22–29. <https://doi.org/10.5751/ES-04853-170322>
10. Zhenzhen Zhang, Sara Meerow, Joshua P. Newell, Mark Lindquist, Enhancing landscape connectivity through multifunctional green infrastructure corridor modeling and design. *Urban Forestry & Urban Greening*, Volume 38, 2019, Pages 305-317, <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.10.014>.
11. Groome D. “Green corridors”: a discussion of planning concept. *Landscape and Urban Planning*. 1990. V. 19. N 4. P. 383–387. [https://doi.org/10.1016/0169-2046\(90\)90044-3](https://doi.org/10.1016/0169-2046(90)90044-3).
12. Швець В.В., Калініченко В.С., Кудлаєнко О.О. Аналіз та вдосконалення зеленого каркасу міста на прикладі м. Вінниці. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві: науково-технічний збірник*, 2013. № 1. С. 83–87. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Stmkb_2013_1_18
13. Кузик І., Царик Л. Геоекоекологічна оцінка структури комплексної зеленої зони міста Тернопіль та її оптимізація. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. Вип. 34. 2020. С. 8–18. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2020-34-01>
14. Гаркава О. М. Зелена зона Києва: історичний аналіз та перспективи розвитку. *Науковий вісник НАУ*. 2006. Вип. 96. С. 269–276.
15. Білінова М., Проценко Д. (2025). Зелені коридори як інструмент екодизайну для відновлення привабливості занедбаних міських просторів. *Актуальні проблеми сучасного дизайну*. VII Міжнародна науково-практична конференція (Київ, 4 квітня 2025 р.). Київ, КНУТД. С. 113.

16. Верех О.Ю. Формування ландшафтно-екологічної системи зелених насаджень у місті. Проблеми дендрології та фітомеліорації. Львів: ЛЛТУ, 1991. С. 45.
17. Інструкція з інвентаризації зелених насаджень у населених пунктах України: із змінами згідно Наказу Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства № 134 (з0544-14) від 12.05.2014. Електронний ресурс: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0182-02#Text>
18. Визначник рослин України : учбовий посібник / Інститут ботаніки ім. М.Г. Холодного АН УРСР, А.І. Барбарич, Є.М. Бродіс, О.Д. Вісюлін, М.І. Котов та ін.; Редкол.: Відп. ред. Д. К. Зеров. Вид. друге, виправлене і доповнене. Київ : Урожай, 1965. 875 с.
19. Заячук В. Я. Дендрологія. Львів: Апірі, 2008. 656 с.
20. Бессонова В.П. Методологія і організація наукових досліджень у садово-парковому господарстві. Київ: Центр учбової літератури, 2019. 261 с.

Дата першого надходження статті до видання: 19.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

МОДЕЛЬ КАСКАДНИХ ГЕОХІМІЧНИХ ЕФЕКТІВ ПРОМИСЛОВОГО ВИДОБУТКУ ТОРФУ НА СУМІЖНІ ПРИРОДООХОРОННІ ОБ'ЄКТИ

Вергельська Н.В.¹, Власенко О.В.², Покшевніцький А.С.³

¹Державна установа «Науковий центр гірничої геології, геоecології та розвитку інфраструктури
Національної академії наук України»
бульв. Академіка Вернадського, 34Б, 03142, м. Київ

²Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»
вул. Василя Липківського Митрополита 35, корп. 2, 03035, м. Київ

³Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища
Національної академії наук України»
пр. Академіка Палладіна, 34А, 03142, м. Київ

vergelska@nas.gov.ua, olegvvvv@gmail.com, ap.2000.orcid@gmail.com

Торфовища – своєрідні довготривалі геохімічні акумулятори важких металів та природних радіонуклідів, проте промисловий видобуток торфу принципово порушує таку функцію, запускаючи каскад взаємопов'язаних геохімічних трансформацій. Незважаючи на зростаючу кількість публікацій щодо окремих аспектів впливу торфовидобування на довкілля, інтегрований концептуальний фреймворк, що пов'язує такі процеси з конкретними шляхами міграції та реципієнтами природоохоронного значення, у науковій літературі відсутній. У праці представлено оригінальну концептуальну модель каскадних геохімічних ефектів промислового видобутку торфу. Модель може слугувати теоретичною та методологічною основою для проведення польових верифікаційних досліджень та розроблення науково обґрунтованих проєктів рекультивації торфових кар'єрів неподалік природоохоронних об'єктів. Вона побудована на основі систематичного синтезу рецензованої наукової літератури та апробована на прикладі низинного торфового родовища у долині р. Десна (Броварський район, Київська область), що безпосередньо межує з НПП «Залісся», розташоване в межах об'єкту Смарагдової мережі UA0000233 «Київське Подесіння». Модель визначає осушення як єдиний тригерний вплив, що одночасно активує чотири геохімічні процеси-тиски: мобілізацію важких металів унаслідок зміни окисно-відновного потенціалу та pH, окислення піриту з формуванням кислого дренажу, аеробну мінералізацію органічної речовини з вивільненням розчиненого органічного вуглецю (POB) та слідових металів, і механічну деструкцію торфу під час видобутку з генерацією металовмісного пилу. Три шляхи міграції – підземні води, поверхневий стік та атмосферне осадження – забезпечують надходження забруднювачів до чотирьох категорій реципієнтів: р. Десна, четвертинний водоносний горизонт, ґрунти та лісові екосистеми НПП «Залісся» і водно-болотний комплекс Смарагдової мережі. Окремий модуль природних радіонуклідів відображає вимоги обов'язкового радіологічного моніторингу (NORM) відповідно до законодавства України у сфері радіаційної безпеки (НРБУ-97). Модель забезпечує відтворювану методологічну основу для геохімічної оцінки ризиків до початку видобутку та для розроблення програм рекультивації об'єктів видобутку мінеральної сировини різних типів, що знаходяться неподалік природоохоронних об'єктів. *Ключові слова:* геохімія торфовищ; видобуток торфу; модель SPPRC; мобілізація важких металів; розчинений органічний вуглець; оцінка впливу на довкілля; Смарагдова мережа; рекультивація.

A Cascade Geochemical Effects Model of Industrial Peat Extraction on Adjacent Protected Areas. Vergelska N., Vlasenko O., Pokshevnytskyi A.

Peatlands are long-term geochemical accumulators of heavy metals and naturally occurring radionuclides; however, industrial peat extraction fundamentally disrupts this function by triggering a cascade of interrelated geochemical transformations. Despite a growing body of publications on individual aspects of peat extraction impacts on the environment, an integrated conceptual framework linking these processes to specific migration pathways and receptors of conservation significance remains absent from the scientific literature. This paper presents an original conceptual model of cascade geochemical effects of industrial peat extraction. The model is designed to serve as the theoretical and methodological foundation for field-based verification studies and the development of scientifically grounded reclamation projects for peat quarries. The model was constructed through systematic synthesis of peer-reviewed scientific literature and applied to a lowland peat deposit in the Desna River valley, Brovary district, Kyiv Region, which is in direct boundary contact with Zalissia National Nature Park and located within Emerald Network object UA0000233 «Kyivske Podesinnia». The model identifies drainage as the single trigger that simultaneously activates four geochemical pressure processes: heavy metal mobilisation due to changes in redox potential and pH, pyrite oxidation with acid drainage formation, aerobic mineralisation of organic matter



with release of dissolved organic carbon (DOC) and trace metals, and mechanical destruction of peat during extraction generating metal-enriched particulate matter. Three migration pathways – groundwater, surface runoff, and atmospheric deposition – convey contaminants to four receptor categories: the Desna River, the quaternary aquifer, the soils and forest ecosystems of Zalissia National Nature Park, and the Emerald Network wetland complex. A dedicated naturally occurring radioactive materials (NORM) module reflects the mandatory radiological monitoring requirements under Ukrainian radiation safety legislation (NRBU-97). The model provides a replicable methodological framework for geochemical risk assessment prior to extraction and for the development of reclamation programmes for mineral extraction sites of various types. *Key words:* peatland geochemistry; peat extraction; SPPRC model; heavy metal mobilisation; dissolved organic carbon; environmental impact assessment; Emerald Network; reclamation

Постановка проблеми. Торфовища займають близько 3% суходолу планети, акумулюючи майже третину запасів ґрунтового вуглецю, що робить їх непропорційно важливими у глобальних біогеохімічних циклах і кліматорегуляції [1, 2]. З геохімічної точки зору торфовища є довготривалими акумуляторами важких металів, металоїдів і природних радіонуклідів завдяки відновлювальним умовам постійного водонасичення та винятковій комплексуючій здатності гумінових і фульвокислот, частка яких може сягати 60–70% загальної органічної маси [3]. Ця акумулятивна функція визначає подвійну екологічну роль торфовищ: інтактні торфовища слугують природними геохімічними бар'єрами, тоді як будь-яке антропогенне порушення, що руйнує редокс-рівновагу, здатне перетворити їх на джерела вивільнення токсичних речовин в суміжні екосистеми [4].

Промисловий видобуток торфу залишається одним із найбільш геохімічно деструктивних видів порушення торфовищ. Осушення, як обов'язковий підготовчий етап видобутку, знижує рівень ґрунтових вод і переводить торфовий матрикс з анаеробних відновлювальних умов в аеробні окислювальні, запускаючи каскад взаємопов'язаних геохімічних трансформацій: мобілізацію раніше іммобілізованих важких металів, окислення піриту і формування кислого дренажу, аеробну мінералізацію органічної речовини з вивільненням розчиненого органічного вуглецю (РОВ) і поживних речовин, а також генерацію металовмісного пилу при механічному фрезеруванні [5, 6]. Ці процеси не функціонують ізольовано, вони відбуваються одночасно, взаємодіють між собою і поширюються через численні шляхи міграції, зрештою впливаючи на реципієнти далеко за межами ліцензійної площі [7].

Актуальність дослідження. В основу дослідження покладено фреймворк Джерело–Тиск–Шлях–Реципієнт–Наслідок (SPPRC) як методологічна основа моделювання каскадних геохімічних ефектів видобутку торфу. Такий підхід розширює класичну модель Джерело–Шлях–Реципієнт (SPR), що широко застосовується в менеджменті забруднених земель, шляхом явного виокремлення геохімічних процесів-тисків від тригерного впливу-джерела та додавання рівня наслідків, що інтегрує кумулятивні впливи на реципієнтів. Це розширення особливо актуальне для торфових систем, де єдина тригерна подія – осушення – одночасно активує множини геохімічних процесів, що поширюються

через різні шляхи міграції до просторово розподілених реципієнтів. Модель призначена забезпечити теоретичну і методологічну основу для наступних польових верифікаційних досліджень і проектування рекультивації.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Представлені результати пов'язані з актуальними завданнями геохімічного моніторингу та екологічної оцінки наслідків видобутку мінеральної сировини в Україні. Розроблена концептуальна модель каскадних геохімічних ефектів відповідає пріоритетним напрямкам державної екологічної політики у сфері охорони природно-заповідного фонду, раціонального використання надр та рекультивації порушених земель. Практичне значення роботи полягає у створенні методологічного інструменту для інтегрованої геохімічної оцінки ризиків при видобутку мінеральної сировини та науково обґрунтованого проектування рекультивації на об'єктах, розташованих у геохімічному впливі природоохоронних територій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження щодо динаміки важких металів у торфових ґрунтах при зміні типу землекористування [3] свідчать про пряму залежність між ступенем антропогенного порушення торфовища і пулом металів, що переходять у біодоступні форми. Дослідження експорту розчиненого органічного вуглецю з осушених торфовищ до поверхневих водних об'єктів [8] показали що масштаби цього процесу мають глобальне значення і суттєво залежать від характеру землекористування на торфовищі. Щодо емісій парникових газів, дослідження різних стратегій їх скорочення на порушених торфовищах [9] засвідчили що жоден із розглянутих підходів не є універсальним і що вибір стратегії визначається передусім геохімічними умовами конкретного об'єкту. Дослідження поствидобувної ренатуралізації торфовищ [10] встановили що відновлення екологічної стійкості можливе, проте потребує науково обґрунтованого визначення геохімічних цілей рекультивації, досягнення яких забезпечує відновлення природних функцій торфовища.

Разом з тим, незважаючи на значний масив публікацій щодо окремих аспектів впливу торфорозробок, єдиного концептуального фреймворку, що інтегрує ці процеси в когерентну каскадну модель із прив'язкою до конкретних шляхів міграції, реципієнтів природоохоронного значення і цілей рекультивації, у науковій літературі досі немає. Наявні підходи

«Джерело–Шлях–Реципієнт» (SPR), широко застосовані в менеджменті забруднених земель [11], не знайшли систематичного застосування для оцінки геохімічних ефектів видобутку торфу, і жоден з них не визначав геохімічні цільові показники для проектування рекультивації після видобутку.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Відсутність інтегрованого геохімічного фреймворку для оцінки впливу торфодобуток є особливо актуальною проблемою для України. Країна налічує близько 1 562 розвіданих торфових родовищ із загальними запасами 1 853 млн тонн [12], значна частина яких розташована в безпосередній близькості до природоохоронних об'єктів. Київська область зосереджує близько 10% загальноукраїнських запасів торфу з концентрацією родовищ у поліській зоні вздовж долин річок Десна, Ірпін та Трубів [13]. Посадження активного торфодобутку з просторовою суміжністю об'єктів Смарагдової мережі і національних природних парків формує геохімічні профілі ризику, що не описуються жодною з існуючих моделей оцінки впливу: відсутній інтегрований інструментарій, який би пов'язував геохімічні процеси-тиски з конкретними шляхами міграції, реципієнтами природоохоронного значення і цілями рекультивації в єдиній каскадній структурі.

Саме цій невирішеній частині загальної проблеми присвячена дана стаття. Розроблена оригінальна концептуальна модель Джерело–Тиск–Шлях–Реципієнт–Наслідок (модель SPPRC) каскадних геохімічних ефектів видобутку торфу призначена слугувати теоретичною і методологічною основою для польових верифікаційних досліджень та розроблення науково обґрунтованих проєктів рекультивації. Модель апробовано на прикладі низинного торфового родовища у долині р. Десна, Броварський район, Київська область, що безпосередньо межує з НПП «Залісся» і розташоване в межах об'єкту Смарагдової мережі UA0000233 «Київське Подесіння».

Новизна. Уперше розроблено оригінальну концептуальну модель SPPRC (Джерело–Тиск–Шлях–Реципієнт–Наслідок) каскадних геохімічних ефектів промислового видобутку торфу, що, на відміну від класичного підходу SPR (Джерело–Шлях–Реципієнт), явно виокремлює геохімічні процеси-тиски як самостійний ієрархічний рівень і інтегрує обов'язкові вимоги NORM-моніторингу відповідно до законодавства України. Уперше формалізовано каскадну причинно-наслідкову структуру, що пов'язує єдиний тригерний вплив (осушення) з чотирма одночасними геохімічними процесами-тисками, трьома шляхами міграції та чотирма категоріями реципієнтів природоохоронного значення в єдиній відтворюваній концептуальній структурі. Уперше інтегровано спеціалізований модуль природних радіонуклідів, що визначає шляхоспецифічну поведінку частково-зв'язаних і водорозчинних форм

радіонуклідів для потреб геохімічної оцінки ризиків на об'єктах видобутку торфу поблизу природоохоронних територій.

Методологічне або загальнонаукове значення. Розроблений фреймворк SPPRC забезпечує відтворювану методологічну основу для геохімічної оцінки ризиків видобутку мінеральної сировини різних типів на об'єктах, розташованих у геохімічному впливі природоохоронних територій. У загальнонауковому вимірі запропонований підхід демонструє принцип розрізнення тригерного впливу і активованих ним процесів як методологічно важливий крок у моделюванні каскадних геохімічних трансформацій. Модель також визначає геохімічно специфічні цілі рекультивації, що є методологічним внеском у проектування поствидобувної рекультивації торфових родовищ: кожен захід мінімізації впливу ідентифікується на конкретному рівні каскаду (Джерело, Тиск, Шлях), що підвищує спрямованість та обґрунтованість природоохоронних заходів.

Викладення основного матеріалу. Концептуальна модель побудована в чотири послідовних кроки.

Крок 1 – Ідентифікація джерела. Первинний антропогенний тригер визначено шляхом систематичного аналізу опублікованої літератури з геохімії осушення торфовищ і перегляду звіту з оцінки впливу на довкілля (ОВД) для торфового родовища у долині р. Десна, Броварський район, Київська область. Осушення підтверджено як обов'язковий підготовчий етап промислового видобутку торфу, що незворотно змінює окисно-відновні умови торфового матриксу.

Крок 2 – Класифікація процесів-тисків. Геохімічні процеси, що активуються осушенням, класифіковано за чотирма категоріями відповідно до домінуючого механізму: (i) зміна окисно-відновного потенціалу та pH з мобілізацією важких металів; (ii) окислення піриту з формуванням кислого дренажу; (iii) аеробна мінералізація органічної речовини з вивільненням РОВ, амонійного азоту та слідових металів (Fe, Mn); (iv) механічна деструкція торфу при видобутку з генерацією металовмісного пилу. Критерії класифікації отримано з рецензованої літератури (2020–2025 pp.).

Крок 3 – Визначення шляхів міграції та реципієнтів. Виділено три шляхи міграції: підземні води, поверхневий стік та атмосферне осадження. Реципієнти визначені на основі просторової конфігурації кейс-стаді: р. Десна з притоками, четвертинний водоносний горизонт місцевого водопостачання, ґрунти та лісові екосистеми НПП «Залісся», об'єкт Смарагдової мережі UA0000233 «Київське Подесіння».

Крок 4 – Інтеграція модуля природних радіонуклідів. До моделі включено спеціалізований модуль природних радіонуклідів, що відображає обов'язкові вимоги радіологічного моніторингу відповідно до законодавства України у сфері радіаційної безпеки.

Згідно із Законом України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» (№ 39/95-ВР) [14] і Нормами радіаційної безпеки України (НРБУ-97) [15], усі підприємства, що провадять видобуток мінеральної сировини, зобов'язані здійснювати щорічну радіологічну оцінку порід родовища. Модуль формалізує геохімічні шляхи міграції природних радіонуклідів від місця видобутку до суміжних реципієнтів – шляхи, що не охоплюються стандартними радіологічними обстеженнями робочих місць.

Модель апробовано на прикладі низинного торфового родовища у долині р. Десна, Броварський район, Київська область, Україна ($50^{\circ}38' - 50^{\circ}39'$ пн. ш., $30^{\circ}45' - 30^{\circ}46'$ сх. д.). Родовище відноситься до низинного типу трясинно-осоково-очеретяного підтипу і розташоване на лівобережній надзаплавній терасі р. Десна, за 2–3 км від русла. Південна межа об'єкту дослідження безпосередньо межує з НПП «Залісся», а його територія входить до складу об'єкту Смарагдової мережі UA0000233 «Київське Подесіння». Основні параметри об'єкту, використані в моделі: середня потужність торфового покладу 1,1 м; середній ступінь розкладу 24,3%; середня вологість 89,1%; середня зольність 24,0%; глибина залягання четвертинного водоносного горизонту 0,8–1,7 м; безпосередній контакт із межею НПП «Залісся» (південна межа); валовий викид пилу при фрезеруванні 0,00063 г/с.

Розроблена концептуальна модель каскадних геохімічних ефектів видобутку торфу включає п'ять ієрархічних рівнів: Джерело, Тиск, Шлях, Реципієнт та Наслідок, доповнених рівнем Реагування, що відображає заходи мінімізації впливу і рекультивації (рис. 1).

Модель побудована як спрямований каскад, в якому єдина тригерна подія – джерело, поширюється через множину одночасних процесів-тисків і розгалужених шляхів міграції, зрештою впливаючи на просторово розподілених реципієнтів з формуванням кумулятивних геохімічних наслідків на рівні екосистем. Модуль природних радіонуклідів інтегрований як наскрізний елемент, що відображає поведінку забруднювачів на рівнях Тиску і Шляху відповідно до обов'язкових вимог NORM-моніторингу. Участь природних радіонуклідів (NORM) у шляхах міграції розглядається лише за умови перевищення встановлених порогових значень питомої активності, визначених відповідно до чинних нормативів радіаційної безпеки.

Тригерним впливом-джерелом визначено осушення торфового масиву, що є обов'язковим підготовчим етапом промислового видобутку. Осушення знижує рівень ґрунтових вод на 1,5–2,0 м через систему осушувальних каналів, незворотно переводячи геохімічне середовище торфового матриксу з анаеробних відновлювальних умов в аеробні окислювальні. Цей перехід є ключовою подією, що запускає всі подальші геохімічні трансформації, оскільки іммобілізація важких металів в інтактних торфови-

щах фундаментально залежить від підтримання відновлювальних умов [3, 5]. На об'єкті дослідження осушення підтверджено як перший операційний етап до початку видобутку. Середня потужність торфу 1,1 м у поєднанні з малою глибиною залягання четвертинного водоносного горизонту (0,8–1,7 м) означає, що осушувальні канали пронизують увесь торфовий профіль і формують пряме гідравлічне з'єднання між окисленим горизонтом торфу і шляхом підземних вод, суттєво підвищуючи ризик переносу забруднювачів на рівень реципієнтів.

Виявлено чотири геохімічні процеси-тиски, що одночасно активуються осушенням (рис. 1):

Процес 1 – Зміна окисно-відновного потенціалу та pH з мобілізацією важких металів. Перехід від відновлювальних до окислювальних умов дестабілізує металоорганічні комплекси, утворені між важкими металами та гуміновими і фульвокислотами. Раніше іммобілізовані в торфовому матриксі метали, зокрема Cd, Pb, Cu, Zn, вивільняються в ґрунтовий розчин у біодоступних формах. Ступінь мобілізації металів прямо пропорційний масштабу осушення і зольності торфу [3]. На об'єкті дослідження середня зольність 24,0% і низький ступінь розкладу 24,3% свідчать про високий залишковий акумулятивний потенціал і, відповідно, значний пул металів, що можуть мобілізуватись.

Процес 2 – Окислення піриту і формування кислого дренажу. Контакт сульфідних мінералів з атмосферним киснем в умовах осушення ініціює окислення піриту з генерацією сірчаної кислоти і двовалентного заліза. Утворений кислий дренаж характеризується низьким pH та підвищеними концентраціями Fe^{2+} , SO_4^{2-} і співмобілізованих слідових металів. Цей процес додатково посилює мобільність важких металів, знижуючи pH торфу і конкуруючи з органічною речовиною за центри зв'язування металів [6, 16].

Процес 3 – Аеробна мінералізація органічної речовини. Розкладання гумінових і фульвокислот – основних хелатуючих агентів для важких металів у торфовому матриксі, частка яких може сягати 60–70% органічної маси – вивільняє металоорганічні комплекси в ґрунтовий розчин і генерує підвищені концентрації розчинених органічних речовини РОР, амонійного азоту (NH_4^+) та слідових металів Fe і Mn у дренажних водах [6, 17]. Показано, що деградовані торфовища суттєво ускладнюють підготовку питної води у нижніх водозборах через підвищене надходження РОВ [6, 8]. Низький ступінь розкладу торфу (24,3%) на об'єкті дослідження свідчить про наявність значного пулу лабільної органічної речовини, доступної для аеробної мінералізації після осушення, що становить пряму загрозу для якості поверхневих вод басейну р. Десна.

Процес 4 – Механічна деструкція і пилова емісія. Фрезерування та збирання торфу генерують дрібнодисперсні частинки, збагачені важкими металами, що акумулювались у торфовому профілі протягом

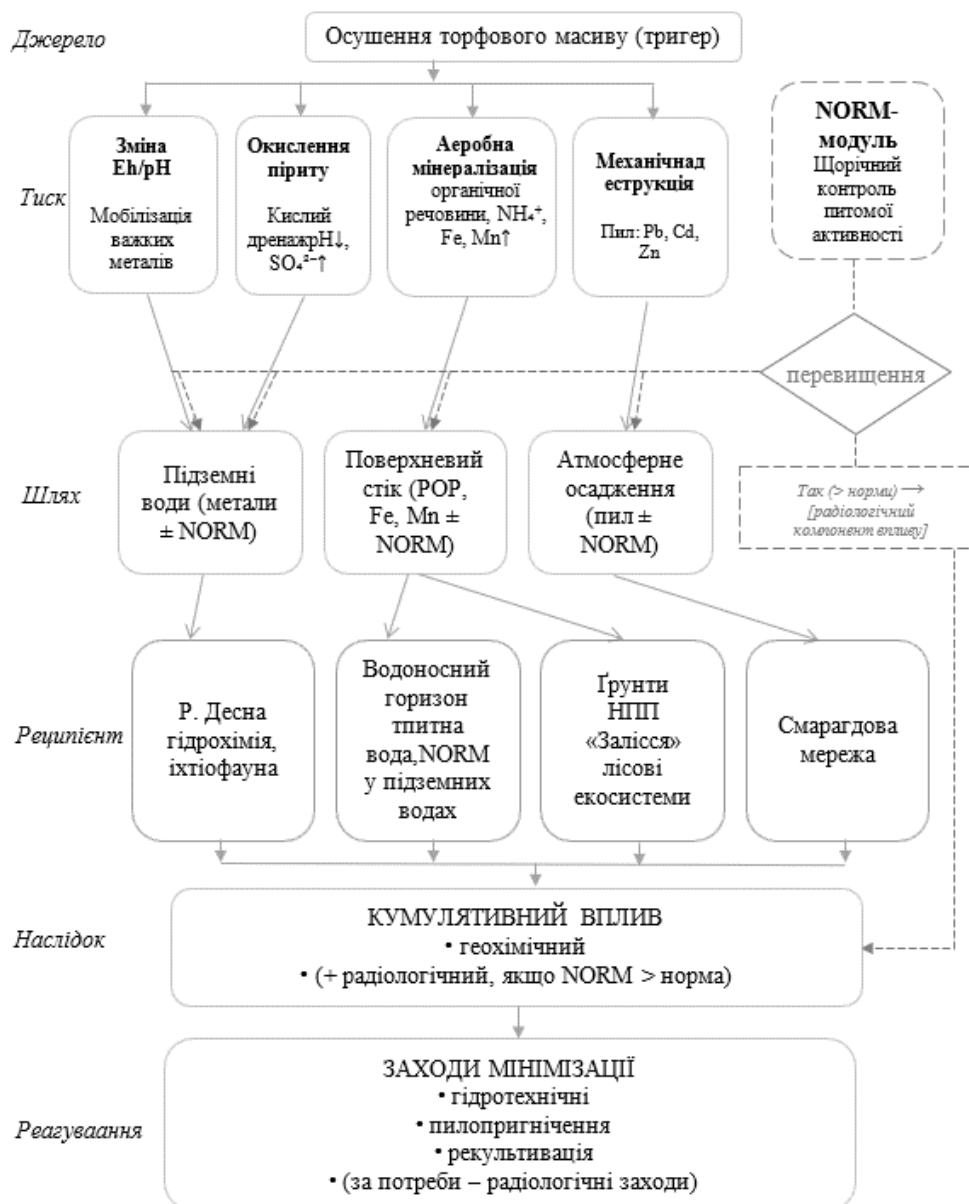


Рис. 1. Концептуальна модель каскадних геохімічних ефектів промислового видобутку торфу на суміжні природоохоронні екосистеми

тисячоліть. Атмосферне осадження металовмісного торф'яного пилу впливає на ґрунти та водойми в радіусі кількох кілометрів від кар'єру [9, 18]. На об'єкті дослідження валовий викид пилу при фрезеруванні становить 0,00063 г/с, з додатковим внеском від кар'єрного транспорту. Безпосередній контакт об'єкту з межею НПП «Залісся» робить атмосферне осадження торф'яного пилу особливо значущим природоохоронним ризиком.

Визначено три шляхи міграції забруднювачів до навколишнього середовища (рис. 1):

Шлях підземних вод. Індукована осушенням окислювальна трансформація торф'яного матриксу мобілізує природні радіонукліди і важкі метали, що здатні мігрувати вертикально до четвертинного водонос-

ного горизонту. Мала глибина залягання горизонту (0,8–1,7 м) на об'єкті дослідження формує короткий вертикальний шлях із прямими наслідками для якості підземних вод місцевого водопостачання [19, 20].

Шлях поверхневого стоку. Кислий дренаж і фільтрат, збагачений РОВ, транспортуються латерально через мережу осушувальних каналів до р. Десна та її приток. Цим шляхом до поверхневих водних об'єктів надходять підвищені концентрації Fe, Mn, РОВ та NH_4^+ з потенційним перевищенням нормативів для водойм рибогосподарського призначення [7, 17].

Шлях атмосферного осадження. Металовмісний торф'яний пил, що генерується при фрезеруванні і транспортуванні, осідає на ґрунтах, водних об'єктах і рослинності суміжних територій. Цей шлях

є основним вектором геохімічного впливу на лісові екосистеми НПП «Залісся» і водно-болотний комплекс Смарагдової мережі UA0000233 [9, 18].

Визначено чотири категорії реципієнтів на основі просторової конфігурації об'єкту дослідження:

- річка Десна з притоками отримує забруднювачі переважно шляхом поверхневого стоку з потенційними наслідками для гідрохімічного режиму, водної біоти та водокористування, включаючи рибне господарство і господарсько-питне водопостачання.

- четвертинний водоносний горизонт є основним реципієнтом шляху підземних вод з наслідками для якості питної води, зважаючи на використання мілких ґрунтових вод місцевим населенням.

- ґрунти та лісові екосистеми НПП «Залісся» отримують забруднювачі шляхом атмосферного осадження металовмісного торф'яного пилу з довгостроковим потенціалом акумуляції в лісовій підстилці та верхньому шарі ґрунту.

- об'єкт Смарагдової мережі UA0000233 «Київське Подесіння» є найширшою одиницею реципієнтів, що охоплює гідрологічно пов'язані водно-болотні та прибережні екосистеми Деснянського екологічного коридору, включаючи оселища, що охороняються Резолюцією № 4 Бернської конвенції.

Інтегрований до моделі модуль природних радіонуклідів (NORM) формалізує геохімічні шляхи міграції природних радіонуклідів від місця видобутку до суміжних реципієнтів – шляхи, що не охоплюються стандартними радіологічними обстеженнями робочих місць, але є суттєвими для оцінки кумулятивного впливу на суміжні природоохоронні екосистеми. Модуль визначає шлях підземних вод як основний вектор для водорозчинних форм радіонуклідів в умовах окислення торфу, а шлях атмосферного осадження, як основний вектор для частинково-зв'язаних форм. Таке розмежування потребує шляхоспецифічного дизайну програм моніторингу і є оригінальним внеском даної моделі порівняно з існуючими геохімічними фреймворками для оцінки торфорозробок.

Модель включає рівень Реагування, що відображає доступні заходи мінімізації і рекультивації на двох часових горизонтах. У період активного видобутку: відстійники для зниження навантаження металів і зависі у дренажних водах; пилопригнічення на видобувних полях і дорогах; NORM-радіологічний і гідрохімічний моніторинг дренажних вод та суміжних водних об'єктів; сезонні обмеження фрезерних операцій у суху вітряну погоду для мінімізації атмосферного пиловнесення. В поствидобувній фазі найефективнішим у довгостроковій перспективі геохімічним рішенням, визначеним у літературі, є рекультивація шляхом обводнення виробленого простору в поєднанні з реовеgetацією аборигенними водно-болотними видами, що відновлює відновлювальне геохімічне середовище, уповільнює мінералізацію залишкового органічного вуглецю і поступово повер-

тає торфовищу функції поглинача вуглецю та іммобілізатора металів [16, 17]. Цей підхід до рекультивації безпосередньо спрямований на розрив геохімічних шляхів, визначених моделлю, шляхом усунення первинного джерела вивільнення забруднювачів.

Розроблена концептуальна модель розвиває існуючі підходи до оцінки впливу торфорозробок у кількох відношеннях. По-перше, попри широке застосування фреймворку SPR в менеджменті забруднених земель і промисловій оцінці ризиків, його систематичне використання стосовно видобутку торфу залишалося обмеженим у науковій літературі. Наявні дослідження впливу торфорозробок переважно розглядали окремі геохімічні процеси ізольовано без їх інтеграції в уніфіковану каскадну структуру, що явно відображає поширення впливів від джерела до реципієнта і визначає цілі рекультивації. Модель SPPRC забезпечує таку інтегруючу структуру.

По-друге, явне виокремлення рівня Тиску від рівня Джерела – розрізнення тригерної події (осушення) і активованих нею геохімічних процесів – більш точно відображає механістичну реальність порушення торфовищ, ніж просте пов'язування «джерело–реципієнт». Це розрізнення має практичне значення, оскільки визначає точки причинно-наслідкового ланцюга, в яких найефективніше можуть бути застосовані заходи моніторингу і рекультивації: пригнічення пилу на рівні Тиску, перехоплення забруднювачів на рівні Шляху або відновлення відновлювальних умов на рівні Джерела шляхом обводнення.

По-третє, інтеграція спеціалізованого модуля природних радіонуклідів, що відображає обов'язкові вимоги NORM-моніторингу відповідно до законодавства України у сфері радіаційної безпеки, є внеском, що не був раніше формалізований у геохімічних моделях для торфовищ. Визначаючи шляхоспецифічну поведінку частинково-зв'язаних та водорозчинних форм радіонуклідів, модуль уможливує розроблення більш цільових програм радіологічного моніторингу порівняно зі стандартними обстеженнями робочих місць.

Апробація моделі SPPRC на об'єкті у долині р. Десна виявляє геохімічний профіль ризику, що заслуговує особливої уваги з трьох причин. По-перше, низький середній ступінь розкладу торфу (24,3%) свідчить про те, що органічний матрикс зберігає високий акумулятивний потенціал і значний пул іммобілізованих забруднювачів, що вивільнятимуться при індукованому осушенні окисленні. По-друге, мала глибина залягання четвертинного горизонту (0,8–1,7 м) формує короткий вертикальний шлях міграції забруднювачів від окисленого горизонту торфу до підземних вод. По-третє, безпосередній контакт об'єкту дослідження з межею НПП «Залісся» означає, що всі три визначені шляхи, а саме: підземні води; поверхневий стік; атмосферне осадження, сходяться на природоохоронних екосистемах міжнародного значення.

Просторова конфігурація об'єкту дослідження, зокрема безпосередній контакт ліцензійної площі видобутку з межею НПП «Залісся», є прикладом геохімічного ризику, для якого існуючі методи оцінки впливу не мають інтегрованого інструментарію. Модель SPPRC є відтворюваною і придатна для застосування на об'єктах видобутку мінеральної сировини різних типів шляхом заміни об'єкто-специфічних параметрів на рівнях Тиску, Шляху та Реципієнта відповідно до характеристик конкретного об'єкту і його геохімічного оточення.

Основна прикладна цінність моделі SPPRC полягає в її здатності визначати геохімічно специфічні цілі рекультивації. Ідентифікуючи, які шляхи переносять які забруднювачі до яких реципієнтів, модель конкретизує завдання рекультивації: відновлення відновлювальних умов для припинення мобілізації важких металів і NORM (втручання на рівні Джерела); відновлення органічної речовини як хелатуючого матриксу для іммобілізації металів (рівень Тиску); реконструкція гідрологічної зв'язності для усунення шляхів кислого дренажу (рівень Шляху); реовегетація для зниження атмосферної пилової емісії (межа рівнів Тиску і Шляху).

Обводнення виробленого простору – захід рекультивації, на який найбільш прямо вказує модель – доведено відновлює функцію накопичення вуглецю і геохімічного бар'єру в поствидобувних торфовищах [21, 22]. Дана модель забезпечує шляхоспецифічне механістичне обґрунтування цього підходу, уможливаючи розроблення програм моніторингу рекультивації навколо конкретних геохімічних індикаторів, передбачених моделлю, а не загальних показників ренатуралізації.

Модель SPPRC має безпосереднє практичне значення для практики ОВД в Україні. Чинні процедури ОВД для видобутку торфу оцінюють геохімічні впливи фрагментарно – викиди пилу, класифікація відходів і водокористування розглядаються окремо, без інтегруючого фреймворку, що охоплює каскадні ефекти і кумулятивний вплив на реципієнтів. Впровадження підходу SPPRC до методології ОВД уможливить більш системне виявлення геохімічних ризиків, більш цільове проектування програм моніторингу і більш ґрунтовне обґрунтування вимог до рекультивації.

На регуляторному рівні модель підтримує доцільність інтеграції шляхоспецифічного NORM-моніторингу до вимог ОВД для об'єктів видобутку торфу і мінеральної сировини, оскільки стандартні радіологічні обстеження робочих місць не охоплюють міграцію забруднювачів до екологічних реципієнтів. Модель SPPRC забезпечує концептуальну основу для розширення програм моніторингу за межі санітарно-захисної зони на екологічно чутливих реципієнтів у зоні геохімічного впливу видобувних операцій.

Висновки. У праці означено та апробовано концептуальну модель SPPRC (Джерело–Тиск–Шлях–

Реципієнт–Наслідок) каскадних геохімічних ефектів промислового видобутку торфу, призначену слугувати теоретичною і методологічною основою для польових верифікаційних досліджень і розроблення проєктів рекультивації. Сформульовано такі висновки:

1. Осушення торфового масиву є єдиним тригерним впливом-джерелом, що одночасно активує чотири геохімічні процеси-тиски – мобілізацію важких металів унаслідок зміни окисно-відновного потенціалу та pH, окислення піриту і формування кислого дренажу, аеробну мінералізацію органічної речовини та генерацію металовмісного пилу – які функціонують одночасно і взаємно підсилюють один одного, спричиняючи кумулятивний геохімічний вплив за межами ліцензійної площі видобутку.

2. Фреймворк SPPRC, сформований на основі класичної моделі SPR, забезпечує структурно адекватний інструмент для інтеграції одночасних геохімічних процесів у когерентну каскадну модель, що явно пов'язує тригерні впливи з просторово розподіленими реципієнтами через визначені шляхи міграції, уможливаючи систематичне визначення пріоритетних параметрів моніторингу і цілей рекультивації.

3. Модуль природних радіонуклідів, що відображає обов'язкові вимоги NORM-моніторингу відповідно до законодавства України у сфері радіаційної безпеки (НРБУ-97, Закон № 39/95-ВР), формалізує шляхоспецифічну поведінку забруднювачів для частинково-зв'язаних і водорозчинних форм радіонуклідів, уможливаючи розроблення програм моніторингу, що виходять за межі стандартних радіологічних обстежень робочих місць і охоплюють вплив на екологічні реципієнти.

4. Апробація моделі на прикладі низинного торфового родовища у долині р. Десна (Броварський район, Київська область), що безпосередньо межує з НПП «Залісся» та розташоване в межах об'єкту Смарагдової мережі UA0000233, засвідчує, що кумулятивний геохімічний ризик видобутку на даному об'єкті поширюється на природоохоронні екосистеми міжнародного значення усіма трьома визначеними шляхами: підземними водами, поверхневим стоком і атмосферним осадженням.

5. Модель SPPRC формує геохімічне обґрунтування для проектування поствидобувної рекультивації та визначає три пріоритетні напрями подальших емпіричних досліджень: польове вимірювання концентрацій важких металів і активності NORM вздовж градієнту осушення на об'єкті дослідження для верифікації прогнозованих інтенсивностей шляхів; кількісна оцінка інтенсивності атмосферного пилового осадження і вмісту металів на межі з НПП «Залісся»; оцінка ефективності рекультивації, зокрема обводнення, у відновленні відновлювального геохімічного середовища і розриві визначених шляхів міграції забруднювачів.

Література

1. United Nations Environment Programme. Global peatlands assessment: The state of the world's peatlands. Nairobi, 2022. URL: <https://www.unep.org/resources/report/global-peatlands-assessment-state-worlds-peatlands> (дата звернення: 23.04.2026).
2. Mander Ü., Järveoja J., Maddison M., Soosaar K., Aavola R., Ostonen I., Salm J.-O. Global peatland greenhouse gas dynamics. *New Phytologist*. 2025. № 246. pp. 94–102. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.20436>.
3. Apori S. O., Giltrap M., Dunne J., Tian F. Human health and ecological risk assessment of heavy metals in topsoil of different peatland use types. *Heliyon*. 2024. № 10 (13). e33624. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33624>.
4. Boiaryn M., Nekos A., Radzii V., Netrobchuk I., Kotsun L., Lugowska M. Impact of peat extraction from the peatlands of upper Pripyat basin on the environment. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*. 2025. № 62. pp. 401–411. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-30>.
5. Li J., Liu Y., Wang H., Chen X. Geochemical regulation of heavy metal speciation in subtropical peatlands. *Land*. 2025. № 14(6). 1256. DOI: <https://doi.org/10.3390/land14061256>.
6. Williamson J., Evans C., Spears B., Pickard A., Chapman P. J., Feuchtmayr H., Leith F., Waldron S., Monteith D. Reviews and syntheses: Understanding the impacts of peatland catchment management on dissolved organic matter concentration and treatability. *Biogeosciences*. 2023. № 20. pp. 3751–3766. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-20-3751-2023>.
7. Pschenyckij C. M., Clark J. M., Shaw P. J., Sizmur T. An examination of the influence of drained peatlands on regional stream water chemistry. *Hydrobiologia*. 2023. № 850. pp. 3313–3339. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10750-023-05188-5>.
8. Rosset T., Binet S., Rigal F., Gandois L. Peatland dissolved organic carbon export to surface waters: Global significance and effects of land use. *Geophysical Research Letters*. 2022. № 49(5). e2021GL096616. DOI: <https://doi.org/10.1029/2021GL096616>.
9. Kibilds J., Abramenko K., Nikodemus O., Elferts D. Pros and cons of strategies to reduce greenhouse gas emissions from peatlands: Review of possibilities. *Applied Sciences*. 2024. № 14(6). 2260. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14062260>.
10. Huth V., Jurasinski G., Günther A. Ecological resilience of restored peatlands to climate change. *Communications Earth & Environment*. 2022. № 3. 208. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00547-x>.
11. Stang C. Closing blank spots and illuminating blind spots in research on emerging contaminants: The source–pathway–receptor–impact–mitigation (SPRIM) continuum as an organizing framework. *Water*. 2023. № 15(3). 526. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15030526>.
12. Державне науково-виробниче підприємство «Державний інформаційний геологічний фонд України». Державний баланс запасів корисних копалин України за 2023 р. Торф. Київ, 2024.
13. Державна служба геології та надр України. Інвестиційний атлас мінерально-сировинної бази Київської області. URL: <https://www.geo.gov.ua/wp-content/uploads/presentations/atlas/invest-atlas-kyiv-oblast.pdf> (дата звернення: 23.04.2026).
14. Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку : Закон України від 08.02.1995 № 39/95-ВР. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95-%D0%B2%D1%80#Text> (дата звернення: 23.04.2026).
15. Про введення в дію Державних гігієнічних нормативів «Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97)» : Постанова Головного державного санітарного лікаря України від 01.12.1997 № 62. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0062282-97#Text> (дата звернення: 23.04.2026).
16. Zak D., Goldhammer T., Cabezas A., Gelbrecht J., Gurke R., Wagner C., Reuter H. Treating acid mine drainage with decomposed organic soil: Implications for peatland rewetting. *Journal of Environmental Management*. 2022. № 313. 114984. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114984>.
17. Frei R. J., Abbott B. W., Dupas R., Marttila H., Peiffer S. Impact of peat extraction on downstream concentrations and attenuation of dissolved organic carbon and nutrients. *Water Resources Research*. 2024. № 60(9). e2024WR037397. DOI: <https://doi.org/10.1029/2024WR037397>.
18. Abolins-Abols M., Samariks V., Lazdins A. Carbon losses from topsoil in abandoned peat extraction sites due to ground subsidence and erosion. *Land*. 2023. № 12. 2153. DOI: <https://doi.org/10.3390/land12122153>.
19. Holiaka D., Yoschenko V., Kashparov V., Levchuk S., Protsak V., Tschiersch J. ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs distribution in Chernobyl forests. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2025. № 281. 107582. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2025.107582>.
20. Labunska I., Levchuk S., Kashparov V., Holiaka D., Yoschenko L., Santillo D., Johnston P. Current radiological situation in areas of Ukraine contaminated by the Chernobyl accident: Part 2. Strontium-90 transfer to culinary grains and forest woods from soils of Ivankiv district. *Environment International*. 2021. № 146. 106282. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106282>.
21. Atkinson C. L., Alibašić H. Issues of peatland restoration across scales: A review and meta-analysis. *Water*. 2025. Vol. 17, № 16. 2428. DOI: <https://doi.org/10.3390/w17162428>.
22. Nugent K. A., Strachan I. B., Strack M., Roulet N. T. When do restored and reclaimed peatlands regain their typical carbon sink function? URL: <https://uwaterloo.ca/can-peat/news/when-do-restored-and-reclaimed-peatlands-regain-their> (дата звернення: 23.04.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 27.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

ЗМІНИ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ВОДИ РІЗНИХ ТИПІВ БІОТОПІВ БОЛОТНОГО МАСИВУ СОМИНЕ (РІВНЕНСЬКИЙ ПРИРОДНИЙ ЗАПОВІДНИК)

Масовець Б.П.¹, Суходольська І.Л.¹, Портухай О.І.², Франчук М.В.³

¹Рівненський державний гуманітарний університет
вул. Ст. Бандери, 12, 33028, м. Рівне

²Громадська організація «Українське географічне товариство»
вул. Володимирська, буд. 44, каб. 2, 01003, м. Київ

³Рівненський природний заповідник
Урочище Дубки 1, 34542, с. Чудель

bohdan.masovets@rshu.edu.ua, iryna.sukhodolska@rshu.edu.ua,
oksana.portukhai@rshu.edu.ua, m_franchuk@ukr.net

Наведено зміни хімічного складу води різних типів біотопів болотного масиву Сомине (Рівненський природний заповідник) (серпень, грудень, 2025 р.). Виявлено низький вміст розчиненого кисню у воді боліт. Найменшу концентрацію розчиненого кисню у воді встановлено для біотопу № 1 Д1.7.2 Мезотрофні болота з ярусом берези. Зафіксовано високі значення біохімічного споживання кисню за 5 діб ($1,87\text{--}23\text{ мгО}_2/\text{дм}^3$), що перевищують нормативні значення у $1,8\text{--}7,7$ рази. Найвища середня концентрація біохімічного споживання кисню характерна для біотопу № 2 Б2.2.3 Болотні та підтоплені ділянки з угрупованнями високих купинних осок. Хімічне споживання кисню у воді різних типів біотопів болотного масиву Сомине змінюється від $40\text{ мгО}_2/\text{дм}^3$ до $342\text{ мгО}_2/\text{дм}^3$, що перевищує допустимі концентрації у $2,7\text{--}22,8$ рази. За середніми значеннями найвище хімічне споживання кисню виявлено у біотопі № 1 Д1.7.2 Мезотрофні болота з ярусом берези. Зазначені зміни кисневого режиму боліт свідчать про низьку аерацію, високу активність бактерій, а також значну кількість органічних речовин. З'ясовано, що переважаючою формою сполук Нітрогену у воді різних типів біотопів є амоній ($1,41\text{--}12,98\text{ мг}/\text{дм}^3$) та нітрити ($0,030\text{--}0,345\text{ мг}/\text{дм}^3$). Показано перевищення граничнодопустимих концентрацій Нітрогену амонійного у $2,8\text{--}26,0$ рази та нітритів у $1,27\text{--}4,31$ рази. Зростання концентрації нітритів свідчить про вповільнення другої фази нітрифікації у різних типах біотопів (№ 1–5) болотного масиву Сомине. За період дослідження найвищі значення вмісту Нітрогену амонійного, нітритів та нітратів встановлено у біотопі № 1 Д1.7.2 Мезотрофні болота з ярусом берези, а найнижчі – у біотопі № 6 Б1.1.1 Оліготрофні водойми з макрофітною рослинністю (оз. Сомине). *Ключові слова:* болото, озеро, масив, амоній, нітрити, нітрати, кисень, біотоп, водно-болотні угіддя.

Changes in the chemical composition of water in different biotope types of the Somyne marsh complex (Rivne Nature Reserve). Masovets B., Sukhodolska I., Portukhai O., Franchuk M.

Changes in the chemical composition of water in different types of biotopes in the Somyne marshland (Rivne Nature Reserve) are presented (August, December, 2025). A low content of dissolved oxygen in the water of the marshes was found. The lowest concentration of dissolved oxygen in water was found in biotope No. 1 D1.7.2 Mesotrophic marshes with a birch layer. High values of biochemical oxygen consumption were recorded over 5 days ($1.87\text{--}23\text{ mgO}_2/\text{dm}^3$), exceeding the normative values by $1.8\text{--}7.7$ times. The highest average concentration of biochemical oxygen consumption is characteristic of biotope No. 2 B2.2.3 Marshy and flooded areas with communities of tall sedges. Chemical oxygen consumption in water of different types of biotopes of the Somyne marsh complex varies from $40\text{ mgO}_2/\text{dm}^3$ to $342\text{ mgO}_2/\text{dm}^3$, which exceeds the permissible concentrations by $2.7\text{--}22.8$ times. According to the average values, the highest chemical oxygen consumption was found in biotope No. 1 D1.7.2 Mesotrophic marshes with a birch layer. These changes in the oxygen regime of the marshes indicate low aeration, high bacterial activity, and a significant amount of organic matter. It has been established that the predominant forms of nitrogen compounds in the water of different types of biotopes are ammonium ($1.41\text{--}12.98\text{ mg}/\text{dm}^3$) and nitrites ($0.030\text{--}0.345\text{ mg}/\text{dm}^3$). The results show that the maximum permissible concentrations of ammonium nitrogen were exceeded by $2.8\text{--}26.0$ times and nitrites by $1.27\text{--}4.31$ times. The increase in nitrite concentration indicates a slowdown in the second phase of nitrification in different types of biotopes (Nos. 1–5) of the Somyne marsh complex. During the study period, the highest values of ammonium nitrogen, nitrites, and nitrates were found in biotope No. 1 D1.7.2 Mesotrophic marshes with birch layer, and the lowest in biotope No. 6 B1.1.1 Oligotrophic water bodies with macrophytic vegetation (Lake Somyne). *Key words:* marsh, lake, complex, ammonium, nitrites, nitrates, oxygen, biotope.

Постановка проблеми. Водно-болотні угіддя – важливі екосистеми, що депонують вуглець, регулюють кліматичні зміни, підтримують водний баланс території, а також забезпечують збереження біологічного різноманіття. Осушення територій водно-бо-

лотних угідь призвели до суттєвого зменшення їхніх площ, забруднення ґрунту і води, а також зумовили руйнування унікального середовища для існування різноманітних біологічних спільнот. Зміна швидкості та обсягу води, що переміщується ландшафтами



водно-болотних угідь, визначає кількість поверхневих і ґрунтових вод та впливає на показники її якості за хімічним складом [14, 15, 16].

Актуальність дослідження. Водно-болотні угіддя виконують функцію природного резервуару води, а також регулюють повеневий режим території, тому дослідження хімічного складу важливі для оцінювання загального екологічного стану екосистем та напрацювання заходів щодо запобігання поширення забруднюючих речовин, в тому числі до об'єктів, які гідрологічно з ними з'єднані.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та науково-практичними завданнями. Унікальність та необхідність відновлення та збереження водно-болотних угідь, які в минулому зазнали наслідків меліорації (сільськогосподарської та військової), незаконного видобутку бурштину сирцю зумовлює об'єднання зусиль науковців для більш детального вивчення цих об'єктів. Дослідження болотного масиву Сомине Рівненського природного заповідника важливе для збереження біорізноманіття, регулювання гідрологічного режиму, підтримання рівноваги екосистеми боліт та екологічної безпеки регіону.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивчення стану боліт активізувалися завдяки розробці та реалізації природоохоронних проєктів. Найчастіше вони спрямовані на стабілізацію та регулювання наближеного до природного стану водного режиму боліт для повноцінного забезпечення їхніх основних функцій. Важливим напрямком є регулювання деградаційних процесів та врахування впливу глобальних змін клімату. Вивчення змін водно-болотних угідь проводять з урахуванням коливання гідрологічного режиму, фізичних трансформацій, забруднення води, використання біологічних ресурсів, а також інтродукції чужорідних видів [1]. Обов'язково аналізують зміни хімічного складу води, оскільки вони відображають екологічний стан боліт. Для багатьох боліт характерна специфічність гідрохімічних показників, що зумовлені насамперед особливостями території. Наприклад, згідно досліджень [4] для болота «Чорне багно» (Закарпатська область) основними чинниками, що призводять до коливань хімічного складу води (зниження показника рН, перевищення нормативних значень БСК₅ тощо), є геологічні особливості регіону, атмосферне живлення болота, накопичення органічних кислот, а також біохімічна активність сфагнових мохів. Проте кожне болото характеризується своїми умовами, які залежать також і від типу біотопу який верифікується відповідним типом рослинності та екологічними умовами.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Болота залишаються найменш вивченим водними об'єктами в Україні. Тривалий час всі зусилля спрямувалися на їхнє осушення і використання для

сільського господарства та інших потреб. Акцент на екосистемні послуги та неправильно проведені роботи осушення боліт призвели до катастрофічних екологічних наслідків (зміни клімату, зниження рівня води в річках, торфові пожежі, зростання викидів парникових газів тощо). Причому їхній вплив з кожним роком відчутніший. Безперечно, відновлення боліт до природного (фонового) стану передбачає врахування фактичного екологічного стану екосистеми та нинішніх глобальних кліматичних змін. Особлива увага приділяється водно-болотним угіддям, які мають міжнародне значення. До таких об'єктів, згідно Рамсарської конвенції, належить водно-болотний масив міжнародного значення UA-2275 «Сомине» Рівненського природного заповідника.

У Рівненському природному заповіднику проводилися дослідження хімічного складу водних екосистем (насамперед озер, річок і каналів) Національним технічним університетом України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» і Національним університетом водного господарства та природокористування під час виконання спеціальних наукових тем. Отримані результати опубліковані у Літописах природи Рівненського природного заповідника [5, 6, 7, 8, 9]. Проте відсутні дослідження хімічного складу води болотних екосистем. Реалізація міжнародних зобов'язань передбачає з'ясування стану водно-болотного угіддя за хімічним складом води та іншими показниками для розробки заходів щодо їхнього ефективного збереження та менеджменту.

Новизна. Уперше визначено хімічний склад води (рН, O₂, БСК₅, ХСК, NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻) болотних екосистем масиву Сомине Рівненського природного заповідника та здійснено порівняльний аналіз його змін у різних типах біотопів.

Методологічне або загальнонаукове значення. Оцінювання хімічного складу води масиву Сомине Рівненського природного заповідника дозволяє визначити екологічний стан різних типів біотопів.

Викладення основного матеріалу. Болотний масив Сомине Рівненського природного заповідника знаходиться у зоні мішаних (хвойно-широколистяних) лісів, область Волинського Полісся, Колківсько-Сарненського фізико-географічного району [10]. Масив Сомине з 2016 р. входить до переліку Рамсарських водно-болотних угідь міжнародного значення. Площа масиву Сомине становить 10852,20 га [12].

Проби для визначення хімічного складу води відбирали на шести станціях болотного масиву Сомине (табл. 1).

Реакцію водного середовища (рН) вимірювали за допомогою іономіра рН-150МА. Розчинений кисень визначали методом йодометричного титрування [11]. Визначення біохімічного споживання кисню за 5 діб (БСК₅) здійснено за «Методика виконання вимірювань біохімічного споживання кисню (БСК₅)» МВВ

Таблиця 1

**Характеристика станцій відбору проб в різних типах біотопів болотного масиву Сомине
(Карасинське ПНДВ) Рівненського природного заповідника**

№	Станції відбору проб	Тип біотопу			Тип болота за трофічністю
		Згідно НКБУ	Згідно класифікації EUNIS	Згідно резолюції 4 Бернської конвенції	
1	кв. 63, виділ 16	Д1.7.2 Мезотрофні болота з ярусом берези	G1.5 Broadleaved swamp woodland on acid peat / Широколистяні ліси на кислому торфі (G1.51 Sphagnum Betula woods / Сфагнові березові ліси)	G1.51 Sphagnum Betula woods / Сфагнові березові ліси.	Мезо-ефтрофне
2	кв. 60, виділ 3	Б2.2.3 Болотні та підтоплені ділянки з угрупованнями високих купинних осок	D5.21 Beds of large Carex spp. / Зарості крупних осок	—	Мезо-ефтрофне
3	кв. 41, виділ 41	Д1.7.1 Евтрофні болота з ярусом вільхи чорної або берези	G1.5 Broadleaved swamp woodland on acid peat / Широколистяні ліси на кислому торфі	—	Мезо-ефтрофне
4	кв. 40, виділ 3	Б4.1 Оліготрофні сфагнові болота	D1.1 Raised bogs / Верхові болота; X04 Raised bog complexes / Комплекси верхових боліт	X04 Raised bog complexes / Комплекси верхових боліт	Оліготрофне
5	кв. 22, виділ 27	Д2.5.2 Оліготрофні болота з ярусом сосни	G3.E Nemoral bog conifer woodland / Неморальні заболочені хвойні ліси	G3.E Nemoral bog conifer woodland / Неморальні заболочені хвойні ліси	Оліготрофне
6	Озеро Сомине	В1.1.1 Оліготрофні водойми з макрофітною рослинністю	C1.1 Permanent oligotrophic lakes, ponds and pools / Постійні оліготрофні озера, ставки та водойми	C1.1 Permanent oligotrophic lakes, ponds and pools / Постійні оліготрофні озера, ставки та водойми	—

Примітка: НКБУ – національний каталог біотопів України [13]; ПНДВ – природоохоронне науково-дослідне відділення

081/12-0014-01 [2]. Вимірювання показника хімічного споживання кисню (ХСК) здійснювали біхроматним окисненням за «Методика виконання вимірювань хімічного споживання кисню біхроматним окисненням (ХСК)» МВВ 081/12-0019-01 [3]. Вміст амонію визначали фотометричним методом за якісною реакцією з реактивом Несслера при довжині хвилі 420 нм. Вміст нітритів визначали діазотуванням реактивом Грісса з утворенням з 1-нафтиламином діазосполуки червоно-фіолетового кольору, яку фотометрували при довжині хвилі 520 нм. Вміст нітратів визначали фотометрично з фенолдисульфокислотою з утворенням нітровмісного фенолу жовтого кольору при довжині хвилі 520 нм. [11].

До важливих показників стану води боліт належить рН. Він регулює швидкість та тривалість проходження хімічних та біологічних процесів у водних об'єктах. Зокрема його зміна впливає на міграцію елементів, а також показники життєдіяльності біоти

(ріст, розвиток тощо). У воді досліджених біотопів болотного масиву Сомине рН змінюється від 4,5 до 6,53 (серпень) та від 4,13 до 6,26 (грудень). Найвищі значення рН зафіксовано для біотопу № 6 В1.1.1 Оліготрофні водойми з макрофітною рослинністю (оз. Сомине) та № 4 Б4.1 Оліготрофні сфагнові болота, а найнижчі – для біотопу № 1 Д1.7.2 Мезотрофні болота з ярусом берези (серпень) та № 5 Д2.5.2 Оліготрофні болота з ярусом сосни (грудень) (рис. 1). Зазвичай низькі значення рН у болотах обумовлені застійним характером водообміну. За таких умов формуються сприятливе середовище для накопичення органічних кислот та відповідно спостерігається підтримання низького рівня рН.

Вміст кисню у воді забезпечує активізацію окисно-відновних процесів, самоочищення, самовідновлення, а також впливає на цикл кругообігу елементів у водних об'єктах. Концентрація розчиненого кисню у воді різних типів біотопів болотного масиву

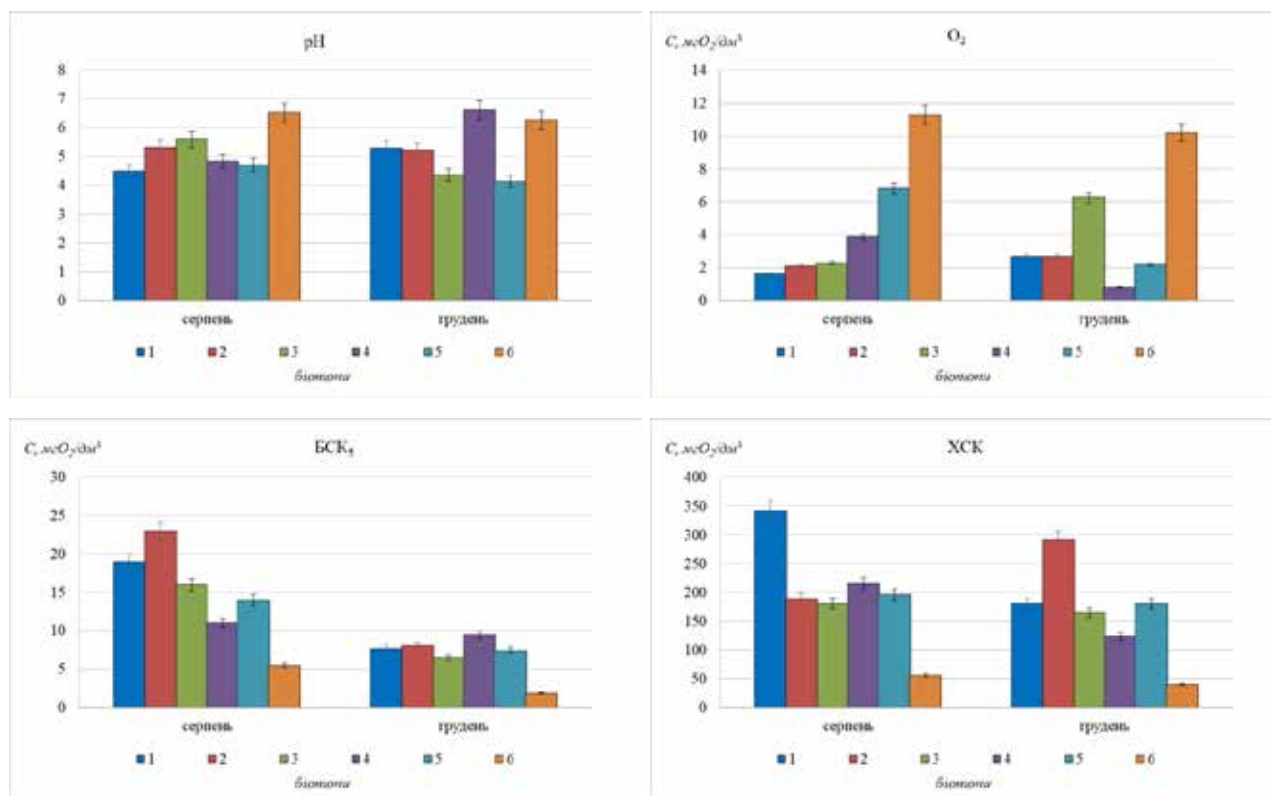


Рис. 1. Зміни вмісту рН, розчиненого кисню, БСК₅ та ХСК у воді різних типів біотопів (1–6, див. табл. 1) болотного масиву Сомине (серпень, грудень, 2025 р.)

Сомине варіює від 1,62 мгО₂/дм³ до 11,30 мгО₂/дм³ (серпень) та від 0,78 мгО₂/дм³ до 10,20 мгО₂/дм³ (грудень). Максимальний вміст розчиненого кисню виявлений у воді біотопу № 6 В1.1.1 Оліготрофні водойми з макрофітною рослинністю (оз. Сомине), що свідчить про інтенсивність процесів самоочищення озера. Мінімальна концентрація розчиненого кисню зафіксована у біотопі № 1 Д1.7.2 Мезотрофні болота з ярусом берези (серпень) та № 4 Б4.1 Оліготрофні сфагнові болота. Насамперед суттєве зниження вмісту розчиненого кисню у воді боліт спричинене повільним розкладанням органічної речовини за дуже інтенсивного споживання як біохімічного, так хімічного кисню. Використання розчиненого кисню на процеси окиснення підтверджують високі значення біохімічного споживання кисню за 5 діб (БСК₅) та хімічного споживання кисню (ХСК). Так, БСК₅ змінюється від 5,47 мгО₂/дм³ до 23 мгО₂/дм³ (серпень) та від 1,87 мгО₂/дм³ до 9,4 мгО₂/дм³ (грудень). Перевищення нормативних значень БСК₅ (ГДК(БСК₅)рибгосп = 3 мг/дм³) у воді біотопів (1,8–7,7 рази – серпень та 2,2–3,1 рази – грудень) свідчить про високу активність бактерій, значну кількість органічних речовин та відповідно низьку аерацію. Найвищі перевищення ГДК виявлені у біотопі № 2 Б2.2.3 Болотні та підтоплені ділянки з угрупованнями високих купинних осок (серпень) та № 4 Б4.1 Оліготрофні сфагнові болота (грудень).

Вміст БСК₅ у різних типах біотопів болотного масиву Сомине змінюється наступним чином: серпень – № 2 (Б2.2.3) > № 1 (Д1.7.2) > № 3 (Д1.7.1) > № 5 (Д2.5.2) > № 4 (Б4.1) > № 6 (В1.1.1); грудень – № 4 (Б4.1) > № 2 (Б2.2.3) > № 1 (Д1.7.2) > № 5 (Д2.5.2) > № 3 (Д1.7.1) > № 6 (В1.1.1).

Активне споживання кисню внаслідок окиснення органічних речовин у болотах масиву Сомине характеризують високі показники ХСК. Так, вміст ХСК у воді досліджених біотопів варіює від 55,7 мгО₂/дм³ до 342 мгО₂/дм³, що перевищує нормативні значення у 3,7–22,8 рази у серпні (ГДК(ХСК)рибгосп. = 15 мг/дм³). У грудні концентрація ХСК змінюється від 40 мгО₂/дм³ до 292 мгО₂/дм³, що вище ГДК у 2,7–19,5 рази. Найнижчі показники ХСК безперечно характерні для біотопу № 6 В1.1.1 Оліготрофні водойми з макрофітною рослинністю (оз. Сомине), а найвищі – для № 1 Д1.7.2 Мезотрофні болота з ярусом берези (серпень) та № 2 Б2.2.3 Болотні та підтоплені ділянки з угрупованнями високих купинних осок (грудень).

Концентрація ХСК у різних типах біотопів болотного масиву Сомине змінюється наступним чином: серпень – № 1 (Д1.7.2) > № 4 (Б4.1) > № 5 (Д2.5.2) > № 2 (Б2.2.3) > № 3 (Д1.7.1) > № 6 (В1.1.1); грудень – № 2 (Б2.2.3) > № 1 (Д1.7.2) = № 5 (Д2.5.2) > № 3 (Д1.7.1) > № 4 (Б4.1) > № 6 (В1.1.1).

Концентрація Нітрогену амонійного у воді досліджених біотопів змінюється від 1,80 мг/дм³ до 12,98 мг/дм³ у серпні, що перевищує ГДК у 3,6–26,0 рази (ГДК(NH₄⁺)рибгосп.=0,5 мг/дм³). Вміст Нітрогену амонійного у грудні коливається від 1,41 мг/дм³ до 6,55 мг/дм³, що вище нормативних значень у 2,8–13,1 рази. Максимальні значення концентрації Нітрогену амонійного виявлені у воді біотопу № 1 Д1.7.2 Мезотрофні болота з ярусом берези та № 5 Д2.5.2 Оліготрофні болота з ярусом сосни, а мінімальні – у біотопі № 6 В1.1.1 Оліготрофні водойми з макрофітною рослинністю (оз. Сомине). Перевищення нормативних значень Нітрогену амонійного у воді біотопів пояснюються їхньою високою стійкістю у заболочених умовах (рис. 2).

Загалом вміст NH₄⁺ у різних типах біотопів болотного масиву Сомине змінюється наступним чином: серпень – № 1 (Д1.7.2) > № 5 (Д2.5.2) > № 3 (Д1.7.1) > № 4 (Б4.1) > № 2 (Б2.2.3) > № 6 (В1.1.1); грудень – № 1 (Д1.7.2) = № 5 (Д2.5.2) > № 4 (Б4.1) > № 3 (Д1.7.1) > № 2 (Б2.2.3) > № 6 (В1.1.1).

Вміст нітритів у воді біотопів болотного масиву Сомине варіює від 0,030 мг/дм³ до 0,266 мг/дм³ у серпні, що перевищує нормативні значення (ГДК(NO₂⁻)рибгосп.=0,08 мг/дм³) у 1,27–3,33 рази. У грудні концентрація нітритів змінюється від 0,036 мг/дм³ до 0,345 мг/дм³, що вище ГДК у 1,77–4,31 рази. Найвищий вміст NO₂⁻ виявлено у воді біотопу

№ 1 Д1.7.2 Мезотрофні болота з ярусом берези (серпень) та № 2 Б2.2.3 Болотні та підтоплені ділянки з угрупованнями високих купинних осок (грудень), а найнижчий – у воді біотопу № 6 В1.1.1 Оліготрофні водойми з макрофітною рослинністю (оз. Сомине).

Вміст NO₂⁻ у різних типах біотопів болотного масиву Сомине змінюється наступним чином: серпень – № 1 (Д1.7.2) > № 4 (Б4.1) > № 3 (Д1.7.1) > № 2 (Б2.2.3) > № 5 (Д2.5.2) > № 6 (В1.1.1); грудень – № 2 (Б2.2.3) > № 1 (Д1.7.2) > № 4 (Б4.1) > № 5 (Д2.5.2) > № 3 (Д1.7.1) > № 6 (В1.1.1).

Концентрація нітратів у воді біотопів болотного масиву Сомине коливається від 0,222 мг/дм³ до 0,487 мг/дм³ (серпень) та від 0,270 мг/дм³ до 0,620 мг/дм³ (грудень). Перевищення нормативних значень вмісту нітратів не виявлено (ГДК(NO₃⁻)рибгосп.= 40 мг/дм³). Максимальні концентрації нітратів характерні для біотопу № 1 Д1.7.2 Мезотрофні болота з ярусом берези (серпень) та № 2 Б2.2.3 Болотні та підтоплені ділянки з угрупованнями високих купинних осок (грудень). Мінімальний вміст нітратів зафіксовано у воді у воді біотопу № 6 В1.1.1 Оліготрофні водойми з макрофітною рослинністю (оз. Сомине) та № 3 Д1.7.1 Евтрофні болота з ярусом вільхи чорної або берези у серпні та грудні.

Концентрація NO₃⁻ у різних типах біотопів болотного масиву Сомине змінюється наступним чином: серпень – № 1 (Д1.7.2) > № 2 (Б2.2.3) = № 4

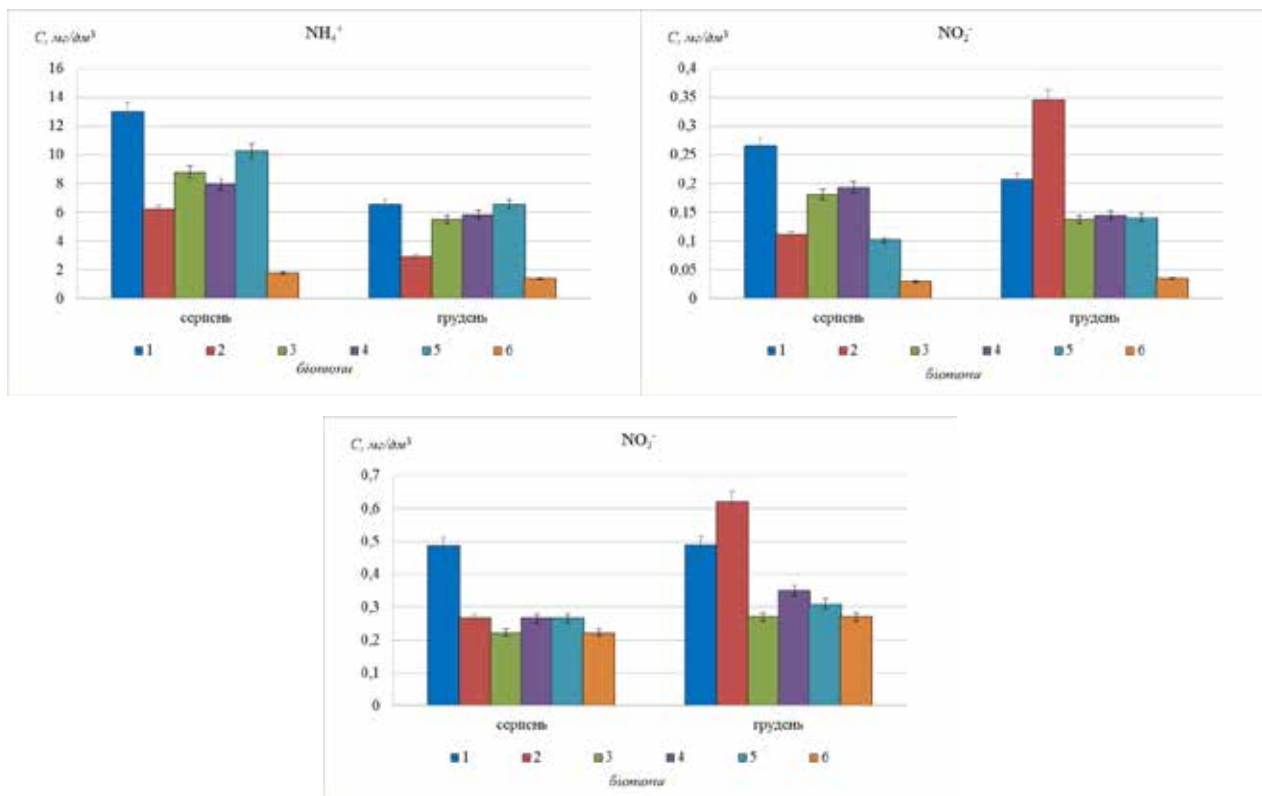


Рис. 2. Зміни вмісту Нітрогену амонійного, нітритів та нітратів у воді різних типів біотопів (1–6, див. табл. 1) болотного масиву Сомине (серпень, грудень, 2025 р.)

(Б4.1) = № 5 (Д2.5.2) > № 3 (Д1.7.1) = № 6 (В1.1.1); грудень – № 2 (Б2.2.3) > № 1 (Д1.7.2) > № 4 (Б4.1) > № 5 (Д2.5.2) > № 3 (Д1.7.1) = № 6 (В1.1.1).

Високі концентрації NH_4^+ та NO_2^- у воді біотопів зумовлені значними запасами Нітрогену, що містяться в ґрунтах території дослідження. Значно менший вміст нітратів пов'язаний з низьким значення рН. Оскільки за таких умов біота насамперед використовує як джерело Нітрогену форму NO_3^- . Крім того, за низького рівня рН та недостатньої кількості розчиненого кисню вповільнюється розвиток нітрифікуючих бактерій (*Nitrococcus*, *Nitrobacter*, *Nitrospira* та *Nitrocystis*), що призупиняє другу фазу нітрифікації. Також очевидно, що розчиненого кисню у воді не достатньо на повне окиснення бактеріями NH_4^+ та перетворення N-NH_4^+ у N-NO_2^- та у N-NO_3^- . Відповідно спостерігається суттєве перевищення NH_4^+ у досліджених типах біотопів. Гальмування другої фази нітрифікації призводить до накопичення NO_2^- та суттєвого перевищення нормативних значень у всіх біотопах, окрім № 6 В1.1.1 Оліготрофні водойми з макрофітною рослинністю (оз. Сомине). Достатня кількість розчиненого кисню у воді оз. Сомине забезпечує повноцінне проходження всіх фаз перетворення Нітрогену. Оскільки для цього біотопу встановлені найменші перевищення нормативних значень Нітрогену амонійного та оптимальні концентрації нітритів та нітратів.

Головні висновки. Хімічний склад води досліджених об'єктів болотного масиву Сомине визначається природними умовами та специфічністю території розташування біотопів різних типів. Для

води боліт характерний переважно низький вміст розчиненого кисню, проте, для озера його значення оптимальні. Високі концентрації БСК₅ та ХСК, що перевищують ГДК (1,8–7,7 рази та 2,7–22,8 рази) свідчать про інтенсивне та постійне використання кисню на окиснення органічних речовин. Найбільше біохімічне споживання кисню встановлено у воді біотопу № 2 Б2.2.3 Болотні та підтоплені ділянки з угрупованнями високих купинних осок та № 4 Б4.1 Оліготрофні сфагнові болота. Високе хімічне споживання кисню виявлено у воді біотопу № 1 Д1.7.2 Мезотрофні болота з ярусом берези та № 2 Б2.2.3 Болотні та підтоплені ділянки з угрупованнями високих купинних осок. Вміст Нітрогену амонійного у воді досліджених біотопів перевищує нормативні значення у 2,8–26,0 рази, а нітритів у 1,27–4,31 рази. У біотопах (№ 1–5) відбувається сповільнення процесів окиснення нітритів до нітратів внаслідок активізації розкладу органічних речовин.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати дослідження хімічного стану води різних типів біотопів можуть бути використані у подальших моніторингових дослідженнях для оцінки впливу екологічних чинників на екосистеми та прогнозування змін якості води, а також для розробки та реалізації заходів щодо зменшення забруднення водно-болотних угідь. Окрім цього, дані хімічного аналізу будуть використані для впровадження передпроектного і післяпроектного моніторингу з відновлення гідрологічного режиму масиву Сомине, який наразі реалізується в рамках міжнародного проекту «Дике Полісся».

Література

1. Алмашова В.С. Критерії оцінки визначення екологічного стану водно-болотних угідь в Україні. *Водні біоресурси та аквакультура*. 2024. № 2(16). С. 62–80. <https://doi.org/10.32782/wba.2024.2.6>
2. Васюков О.С., Калініченко О.О., Нікітіна С.В., Чапланова Г.М. «Методика виконання вимірювань біохімічного споживання кисню (БСК₅)». МВВ 081/12-0014-01. УкрНДІУП. 2001.
3. Васюков О.С., Калініченко О.О., Юрченко Л.М., Ковальова Л.В. «Методика виконання вимірювань хімічного споживання кисню біхроматним окисненням (ХСК)». МВВ 081/12-0019-01. УкрНДІУП. 2001.
4. Лета В.В., Карабінюк М.М., Роман В.І. Хімічний склад вод оліготрофного болота «Чорне Багно» (Закарпатська область). *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2024. № 4 (74). С. 54–61. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2024.4.5>
5. Літопис природи Рівненського природного заповідника. Т. 15. Сарни, 2014. 270 с.
6. Літопис природи Рівненського природного заповідника. Т. 20. Сарни, 2019. 284 с.
7. Літопис природи Рівненського природного заповідника. Т. 22. Сарни, 2020. 501 с.
8. Літопис природи Рівненського природного заповідника. Т. 23. Сарни, 2021. 543 с.
9. Літопис природи Рівненського природного заповідника. Т. 25. Сарни, 2023. 496 с.
10. Маринич О.М., Пархоменко Г.О., Пашенко В.М., Петренко О.М., Тищенко П.Г. Фізико-географічне районування. Національний атлас України. К.: ДНВП «Картографія». 2007. С. 228–229.
11. Набиванець Б.Й., Осадчий В.І., Осадча Н.М., Набиванець Ю.Б. Аналітична хімія поверхневих вод. Український науково-дослідний гідрометеорологічний інститут. К.: Наукова думка, 2007. 456 с.
12. Наказ Міністерства екології та природних ресурсів України «Про затвердження Положення про Рівненський природний заповідник у новій редакції» від 14 серпня 2014 року № 264. URL: <https://ips.ligazakon.net/document/fn006739> (дата звернення: 20.12.2025).
13. Національний каталог біотопів України. За ред. А.А. Куземко, Я.П. Дідуха, В.А. Онищенко, Я. Шеффера. К.: ФОП Клименко Ю.Я., 2018. 442 с.
14. Weber, M., Cutlac, M. "Agricultural and water in canada – challenges and reform for the 21 C," in Water Policy and Governance in Canada, eds S. Renzetti and D. Dupont (Basel: Springer International Publishing). 2017. P. 395–416.

15. Wheater, H., Bennett, E., de Loë, R., Friesen, R., Hamilton, K. E., Hepworth, L., et al. Water and Agriculture in Canada: Towards Sustainable Management of Water Resources. The Expert Panel on Sustainable Management of Water in the Agricultural Landscapes of Canada 2013. Ottawa, ON: Council of Canadian Academies.
16. Ye S., Pei L., He L., Xie L., Zhao G., Yuan H., Ding X., Pei S., Yang S., Li X., et al. Wetlands in China: Evolution, Carbon Sequestrations and Services, Threats, and Preservation/Restoration. *Water*. 2022. Vol. 14. P. 1152. <https://doi.org/10.3390/w14071152>

Дата першого надходження статті до видання: 02.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

НАУКОВА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЄКТОВАНОГО ЛАНДШАФТНОГО ЗАКАЗНИКА ЗАГАЛЬНОДЕРЖАВНОГО ЗНАЧЕННЯ «ЗАПЛАВА ДНІПРА»

Гулай В.В.

Центральноукраїнський національний технічний університет
пр. Університетський, 8, 25006, м. Кропивницький
vit.gulay@gmail.com

Проведені польові дослідження з вивчення перспективної території, яка може стати основою для створення нового природоохоронного об'єкту. Дана ділянка орієнтовною площею 840 га знаходиться на схід від м. Світловодськ Кіровоградської області і є природною територією, що малотрансформована господарською діяльністю людини. Значна частина зазначеної території, а саме 406,6 га виділена для ведення лісового господарства і пов'язаних з ним послугами, що у разі цільового використання призведе до порушення природного стану та втрати природоохоронної цінності. Аналіз зібраного матеріалу впродовж 2018-2023 років дозволяє стверджувати про важливість вказаної території для збереження рідкісної флори і фауни, оскільки тут виявлено зростання та перебування 8 видів, що занесені до Червоної книги України, а саме плодоріжки болотної (*Orchis palustris*), поліксени (*Zerynthia polyxena*), ксилокопи фіолетової (*Xylocopa violacea*), дозорця-імператора (*Anax imperator*), ящірки зеленої (*Lacerta viridis*), гадюки степової (*Vipera renardi*), луня польового (*Circus cyaneus*) та орлана-білохвіста (*Haliaeetus albicilla*). Серед рослин угруповання яких занесені до Зеленої книги України тут виявлені глечики жовті (*Nuphar lutea*), латаття біле (*Nymphaea alba*), водяний горіх плаваючий (*Trapa borysthena*) та сальвінія плавуча (*Salvinia natans*). Також тут виявлені види, що внесені до списку регіонально-рідкісних для Кіровоградської області.

З огляду на різноманітність природних стацій в межах визначеної території та значну видову різноманітність флори і фауни є доцільним створення нової природоохоронної території. На основі аналізу результатів проведених досліджень було розроблено клопотання щодо створення ландшафтного заказника загальнодержавного значення під назвою «Заплава Дніпра», яке схвалило Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів у 2023 р. **Ключові слова:** ландшафтний заказник, збереження біологічного різноманіття, Червона книга України, природно-заповідний фонд.

Scientific characterization of the proposed national-level landscape reserve «Dnipro floodplain». Hulai V.

Field studies were conducted to investigate a prospective area that may serve as the basis for the establishment of a new protected natural object. The studied territory, with an approximate area of 840 hectares, is located east of the city of Svitlovodsk in Kirovohrad region and remains relatively little transformed by human activity. A significant portion of this territory – specifically 406,6 hectares – is currently designated for forestry and related services, which, if used for such purposes, would lead to the disruption of its natural state and the loss of its conservation value.

An analysis of data collected between 2018 and 2023 confirms the importance of this area for preserving rare flora and fauna. Research has identified the presence of 8 species listed in the Red Data Book of Ukraine, namely: the bog orchid (*Orchis palustris*), the southern festoon (*Zerynthia polyxena*), the violet carpenter bee (*Xylocopa violacea*), the emperor dragonfly (*Anax imperator*), the european green lizard (*Lacerta viridis*), the steppe viper (*Vipera renardi*), the hen harrier (*Circus cyaneus*) and the white-tailed eagle (*Haliaeetus albicilla*). Among the plant communities listed in the Green Data Book of Ukraine, the following were identified: the yellow water-lily (*Nuphar lutea*), the white water-lily (*Nymphaea alba*), the water caltrop (*Trapa borysthena*) and the floating fern (*Salvinia natans*). Additionally, species included in the list of regionally rare species for the Kirovohrad region were also found. Given the diversity of natural habitats within the defined area and the significant biodiversity of its flora and fauna, the establishment of a new protected area is deemed expedient.

Based on the results of the conducted research, a proposal was developed for the establishment of a national-level landscape reserve titled “Dnipro Floodplain”, which was approved by the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources in 2023. **Key words:** landscape reserve, preserving biological diversity, Red Data Book of Ukraine, nature reserve fund.



Постановка проблеми. Природно-заповідний фонд Кіровоградської області на початок 2026 р. налічує 253 природно-заповідні території та об'єкти, з них 26 – мають статус загальнодержавного значення. Площа природоохоронних територій від загальної площі області складає 4,18 %, що в умовах сьогодення є недостатньою. З метою розширення існуючої мережі природно-заповідного фонду та виявлення нових цінних природоохоронних територій і їх подальшого заповідання, необхідним є інтенсифікація проведення наукових досліджень в цьому напрямку.

Актуальність дослідження. Збереження біотичного та ландшафтного різноманіття завдяки виявленню та заповіданню цінних природних комплексів є одним з основних напрямків для інтеграції нашої країни у європейський природоохоронний простір.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Відповідно до Закону України «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року» в нашій державі заплановано у період до 2030 р. збільшення територій та об'єктів природно-заповідного фонду, що повинно становити 15 % від території держави [1]. Для досягнення такого показника однією з необхідних умов є проведення наукових досліджень з метою виявлення цінних природних територій та подальшого їх збереження шляхом заповідання. З перспективних ділянок для створення нового об'єкту природно-заповідного фонду є територія, що розташовується на схід від м. Світловодськ, на якій у період з 2018-2023 роках нами були проведені польові дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наукові дослідження щодо створення на цих теренах природоохоронної території проводилися Міжвідомчою комплексною лабораторією наукових основ заповідної справи НАН України та Мінекобезпеки України на замовлення Державного управління екологічної безпеки в Кіровоградській області з 1991 року. За результатами дослідження планувалося створення регіонального ландшафтного парку «Білецьківські плавні», території якого мали розташовуватися в межах Кіровоградської та Полтавської областей, орієнтовно між м. Світловодськ та м. Кременчук [2,3]. Але до створеного наказом Президента України № 750/94 від 10.12.1994 р. ландшафтного заказника загальнодержавного значення «Білецьківські Плавні» увійшли лише зазначені території Полтавської області. У 2001 р. цей заказник став частиною регіонального ландшафтного парку «Кременчуцькі Плавні», що розташований також виключно на території Полтавської області.

Згодом згідно наказу Президента України № 774/2008 від 27.08.2008 планувалося на територіях Кіровоградської та Полтавської областей створення

національного природного парку «Кременчуцькі Плавні», яке так і не було реалізоване [4].

На сьогодні цінні території, що були виявлені межах Кіровоградської області не мають природоохоронного статусу та поступово піддаються трансформації під впливом господарської діяльності людини.

Матеріали та методи досліджень.

Дослідження в межах території проводилися у 2018-2023 роках. Рослинний покрив досліджувався маршрутно-рекогносцирувальним методом. У зоологічних дослідженнях використовували набір стандартних методів маршрутних обліків тварин. Визначення видової приналежності комах проводили за фотоматеріалами та зібраними екземплярами.

Результати досліджень та їх обговорення.

Обстежена територія розташовується на схід від м. Світловодськ Кіровоградської області. Має орієнтовну площу близько 840 га [Фото 1]. В межах зазначеної території згідно даних наведених у публічній кадастровій карті України входить земельна ділянка з кадастровим номером: 3525286900:02:000:0622. Тип власності: Державна власність. Цільове призначення: 09.01 Для ведення лісового господарства і пов'язаних з ним послуг для ведення лісового господарства і пов'язаних з ним послуг. Площа: 406,6312 га. За умови освоєння даної ділянки під заліснення тут будуть втрачені цінні природні території.

Рельєф території досить вирівняний, з чисельними протоками і заболоченими луками. Обстежена територія характеризується досить значною різноманітністю рослинних асоціацій, зокрема тут виявлено – лучну, водну, прибережно-водну рослинність, піщані степи, лісову рослинність.

Найбільшу площу на обстеженій території займають сухі піщані луки на яких переважають келерія блакитна (*Koeleria grauca*), кунічник наземний (*Calamagrostis epigeois*), костриця Беккера (*Festuca beckeri*), полин польовий (*Artemisia campestris*). Також тут виявлені такі псамофільні види як: жито дике (*Secale sylvestre*), осока колхідська (*Carex ligerica*), конюшина польова (*Trifolium arvense*), гвоздика Борбаша (*Dianthus borbashii*), щавель горобинний (*Rumex acetosella*), очиток шестирядний (*Sedum sexangulare*), очиток звичайний (*Hylotelephium argutum*), козельці (*Tragopogon dasyrhynchus*) та ін.

Прибережно-водна рослинність утворює смуги вздовж проток, тут переважають наступні види: рогіз вузьколистий (*Typha angustifolia*), рогіз широколистий (*T. latifolia*), очерет звичайний (*Phragmites australis*), лепешняк великий (*Glyceria maxima*), осока гостра (*Carex acuta*) та ін. Зрідка трапляються зарості рогузу Лаксмана (*Typha laxmanii*), комишу лісового (*Scirpus sylvaticus*), цикути отруйної (*Cicuta virosa*), плавушника болотного (*Hottonia palustris*), вербозілля китицевого (*Naumburgia thyrsoflora*), аморфи чагарникової (*Amorpha fruticosa*).

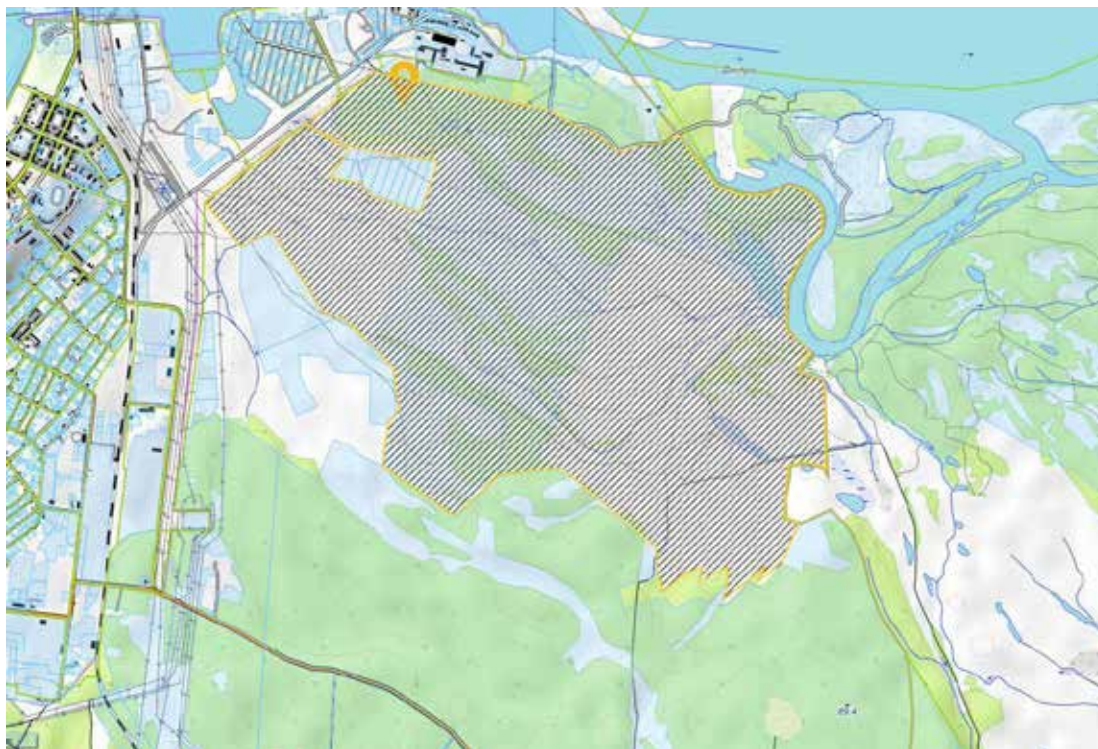


Фото. 1. Розташування та межі території «Заплава Дніпра», яку пропонується включити до складу природно-заповідного фонду України

Справжні та болотисті луки поширені на вирівняних елементах рельєфу. Тут зустрічаються осока гостра (*Carex acuta*), лепешняк великий (*Glyceria maxima*), тонконіг лучний (*Poa pratensis*), мітлиця повзуча (*Agrostis stolonifera*), пірій повзучий (*Elytrigia repens*) та ін. Також тут зростає рідкісна орхідея – плодоріжка болотна (*Orchis palustris*), що занесена до Червоної книги України [5,6].

Заплавні ліси зустрічаються у вигляді смуг, що пролягають вздовж водотоків. Вони складаються переважно з таких видів як: тополя чорна (*Populus nigra*), тополя біла (*P. alba*), верба біла (*Salix alba*), вільха сіра (*Alnus incana*) та ін. У підліску виявлено ожину звичайну (*Rubus caesius*), бузину чорну (*Sambucus nigra*), бруслину європейську (*Euonymus europaeus*), клен татарський (*Acer tataricum*) та ін.

Дослідження виявило значну кількість видів трав'янистих рослин, серед яких найбільш поширеними були: хвилівник звичайний (*Aristolochia clematilis*) пшінка весняна (*Fscarsa verna*), чистотіл звичайний (*Chelidonium majus*), фіалка ранкова (*Viola matutina*), фіалка польова (*V. arvensis*), фіалка собача (*V. canina*), гірчиця польова (*Sinapis arvensis*), дика редька (*Raphanus raphanistrum*), мак дикий (*Papaver rhoeas*), рутка Вайяна (*Fumaria vaillantii*), кропива жалка (*Urtica urens*), зірочник середній (*Stellaria media*), смілка звичайна (*Silene vulgaris*), мильнянка лікарська (*Saponaria officinalis*), лутига татарська (*Atriplex tatarica*), щавель прибережний (*Rumex hydrolapatum*), гірчак березковидний (*Polygonum convolvulus*), коноплі рудеральні

(*Cannabis ruderalis*), щириця загнута (*Amaranthus retroflexus*), гикавка сіра (*Berteroa incana*), суріпиця звичайна (*Barbarea vulgaris*), веснянка весняна (*Erofilla verna*), кінський часник черешковий (*Alliaria perfoliata*), сухоребрик лікарський (*Sisymbrium officinale*), лобода міська (*Chelidonium urbicum*), гірчак пташиний (*Polygonum aviculare*), кардарія крупковидна (*Cardaria draba*), грицики звичайні (*Capsella bursa-pastoris*), кудрявець Софії (*Descurainia sophia*), перстач сріблястий (*Potentilla argentea*), кульбаба лікарська (*Taraxacum officinale*), латук компасний (*Lactuca serriola*), зірочки малі (*Gagea minima*), пірій повзучий (*Elytrigia repens*), бромус м'який (*Bromus mollis*), тонконіг стиснутий (*Poa compressa*), гусятник волосистий (*Eragrostis pilosa*), мишій зелений (*Setaria viridis*), гравілат міський (*Geum urbanum*), люцерна хмелевидна (*Medicago lupulina*), подорожник великий (*Plantago major*), подорожник середній (*P. media*), буркун білий (*Melilotus albus*), буркун лікарський (*Melilotus officinalis*), конюшина повзуча (*Trifolium repens*), ксантоксаліс джерельна (*Xanthoxalis fontana*), герань маленька (*Geranium pusillum*), грабельки звичайні (*Erodium cicutarium*), морква дика (*Daucus carota*), берізка польова (*Convolvulus arvensis*), синяк звичайний (*Erodium vulgare*), гостриця лежача (*Asperugo procumbens*), льонок звичайний (*Linaria vulgaris*), вероніка персидська (*Veronica persica*), горлянка женецька (*Ajuga genevensis*), розхідник звичайний (*Glechoma hederaceae*), глуха кропива стеблеогортна (*Lamium amplexicaule*), м'яточник бур'яно-

вий (*Ballota ruderalis*), злинка канадська (*Erygeron canadensis*), стеноквітс однорічний (*Stenactis annua*), амброзія полинолиста (*Ambrosia artemisiifolia*), галінсога дрібноквіткова (*Galinsoga parviflora*), деревій майже звичайний (*Achillea submillifolium*), хамоміла обідрана (*Chamomilla recutita*), ромашка продірявлена (*Matricaria perforata*), полин звичайний (*Artemisia vulgaris*), підбіл звичайний (*Tussilago farfara*), жовтозілля звичайне (*Senecio vulgaris*), осот звичайний (*Cirsium vulgare*) тощо.

Підводні угруповання рослин представлені переважно наступними видами: кушир занурений (*Ceratophyllum demersum*), водопериця колосиста (*Myriophyllum spicatum*), рдесник блискучий (*Potamogeton lucens*), рдесник кучерявий (*P. crispus*) та ін.

Рослини водойм, що мають плаваюче листя представлені такими видами як: жабурник звичайний (*Hydrocharis morsus-ranae*), рдесник плаваючий (*Potamogeton natans*), ряска мала (*Lemna minor*), ряска триборозенчаста (*L. trisulca*), гірчак земноводний (*Persicaria amphibia*). Серед рослин угруповання яких занесені до Зеленої книги України тут виявлені глечики жовті (*Nuphar lutea*), латаття біле (*Nymphaea alba*), водяний горіх плаваючий (*Trapa borysthena*) та сальвінія плаваюча (*Salvinia natans*) [7].

Зоологічні дослідження виявили значну кількість видів хребетних та безхребетних тварин, що зумовлено значним розмаїттям середовищ існування.

Найбільш чисельною групою тварин обстеженої території були безхребетні тварини, зокрема представники класу комах (*Insecta*).

З представників ряду Бабки (*Odonata*) тут найбільш часто зустрічаються наступні види: плосконіжка звичайна (*Platycnemis pennipes*), бабка плоска (*Libellula depressa*), сіролютка руда (*Sympetrum fusca*), тонкочеревець перев'язаний (*Sympetrum pedemontanum*), стрілка звичайна (*Coenagrion hastulatum*), коромисло руде (*Aeshna isosceles*) та ін.

Ряд Прямокрилі (*Orthoptera*) представлений видами: цвіркун польовий (*Gryllus campestris*), кобилка болотяна (*Stethophyma grossum*), коник зелений (*Tettigonia viridissima*), кобилка чорносмуга (*Oedaleus decorus*), коник польовий (*Chorthippus brunneus*), лєтєуха звичайна (*Aiolopus thalassinus*), коник блакитнокрилий (*Oedipoda caerulescens*).

Найбільш численними представниками ряду Напівтвердокрилі (*Hemiptera*) були – клоп смугастий (*Graphosoma italicum*), клоп польовий (*Lygus pratensis*), простема (*Prostemma aeneicollis*), редувій ряджений (*Reduvius personatus*), червоноклоп червоний (*Pyrrhocoris apterus*), клоп шавлевий (*Coreus marginatus*), етус чорний (*Aethus nigratus*), щитник ягідний (*Dolycoris baccarum*), клопик грушевий (*Stephanitis pyri*), щитник чорношипий (*Carpocoris flucispinus*).

Досить численними на обстеженій території є представники ряду Твердокрилі (*Coleoptera*), зокрема тут виявлені такі види як: сонечко п'я-

тикрапкове (*Coccinella quinquepunctata*), сонечко семикрапкове (*Coccinella septempunctata*), бронзівка смердюча (*Oxythyrea funesta*), бронзівка золотиста (*Cetonia aurata*), слоник грушевий (*Rhynchites giganteus*), довгоносик мармуровий (*Liparus tigrinus*), букарка (*Coenorrhinus pauxillus*), оленка (*Epicometris hirta*), турун садовий (*Carabus hortensis*), оленик (*Dorcus parallelipipedus*), вусач квітковий звичайний (*Toxotus cursor*), хрущик рудий (*Serica brunnea*), хрущ червневий (*Amphimallon solstitialis*), довгоносик вишневий (*Rhynchites auratus*), заболонник березовий (*Scolytus ratzeburgi*), казарка (*Rhynchites bacchus*), заболонник плодовий (*Scolytus mali*), жук-носоріг (*Oryctes nasicornis*), клітра чотирикапкова (*Clytra quadripunctata*), листоїд тополевий (*Melasma populi*).

Фауна Перетинчатокрылих (*Hymenoptera*) представлена переважно наступними видами – їздець риса (*Rhyssa persusoria*), бджола антофора (*Anthophora acervorum*), бджола андрена рудоспинна (*Andrena haemorrhoa*), бджола осмія руда (*Osmia rufa*), мурашка садова чорна (*Lasius niger*), джміль кам'яний (*Bombus lapidarius*), оса паперова (*Polistes gallicus*), амофіла піщана (*Ammophila sabulosa*).

На обстеженій території численними є представники ряду Лускокрилі (*Lepidoptera*), зокрема: синявець Коридон (*Polyommatus coridon*), синявець Аргіад (*Everes argiades*), совка зубчастокрила (*Scoliopteryx libatrix*), сонцевик павич (*Inachis io*), бражник липовий (*Mimastiliae*), стрічка звичайна червона (*Catocala nupta*), сонцевик адмірал (*Vanessa atalanta*), красоцвіт зоряний (*Anthocharis cardamines*), дукачик фіялковий (*Lycaena arcyphron*), цитринець (*Rhodocera rhamni*), білан ріп'яний (*Pieris rapae*), махаон (*Papilio machaon*), подалірій (*Iphiclidus podalirius*), галатея (*Melanargia galathea*) та ін.

Серед комах, на обстеженій території, виявлені види, що входять до «Переліку видів судинних рослин і тварин, які підлягають особливій охороні на території Кіровоградської області» (2018), а саме: сатир Дріада (*Minois dryas*), еуцера довговуса (*Eucera longicornis*), богомол звичайний (*Mantis religiosa*), водяний скорпіон (*Nepa cinerea*), коромисло синє (*Aeshna cyanea*). Також тут виявлено перебування видів, що занесені до Червоної книги України – поліксена (*Zerynthia polyxena*), ксилокопа фіолетова (*Xyllocopa violacea*), дозорець-імператор (*Anax imperator*) [5,6].

Мешканці водойм представлені такими видами риб як: карась сріблястий (*Carassius gibelio*), короп (*Cyprinus carpio*), в'юн (*Misgurnus fossilis*), лин (*Tinca tinca*), окунь річковий (*Perca fluviatilis*), щипавка (*Cobitis taenia*), щука звичайна (*Esox lucius*) та ін.

З амфібій на обстеженій території виявлені наступні види: жаба ставкова (*Pelophylax lessonae*), жаба озерна (*Pelophylax ridibundus*), рахавка звичайна (*Hyla arborea*), тритон звичайний (*Lissotriton*

vulgaris), кумка червоночерева (*Bombina bombina*), землянка звичайна (*Pelobates fuscus*) – останні два види входять до «Переліку видів судинних рослин і тварин, які підлягають особливій охороні на території Кіровоградської області» (2018). Фауна рептилій представлена такими видами як: вуж звичайний (*Natrix natrix*), вуж водяний (*Natrix tessellata*), черепаха болотяна європейська (*Emys orbicularis*), ящірка прудка (*Lacerta agilis*), ящірка зелена (*Lacerta viridis*) та гадюка степова (*Vipera renardi*), останні два види занесені до Червоної книги України.

Досить численною є фауна птахів, зокрема тут виявлено перебування таких видів як: сойка (*Garrulus glandarius*), сорока (*Pica pica*), ворона сіра (*Corvus cornix*), крук (*Corvus corax*), щиглик (*Carduelis carduelis*), зеленяк (*Chlorus chloris*), зяблик (*Fringilla coelebs*), горлиця кільчаста (*Streptopelia decaocto*), припутень (*Columba palumbus*), сова вухата (*Asio otus*), чиж (*Spinus spinus*), синиця велика (*Parus major*), повзик (*Sitta europaea*), великий строкатий дятел (*Dendrocopos major*), малий строкатий дятел (*Dendrocopos minor*), підкоришник (*Certhia familiaris*), бугайчик (*Exobrychus minutus*), чапля біла велика (*Egretta alba*), чапля сіра (*Ardea cinerea*), лелека білий (*Ciconia nigra*), крижень (*Anas platyrhynchos*), чирка мала (*Anas crecca*), широконоса (*Anas chapeata*), курочка водяна (*Gallinula chloropus*), лиска (*Fulica atra*), очеретянка велика (*Acrocephalus arundinaceus*), плиска жовта (*Motacilla flava*), ластівка сільська (*Hirundo rustica*), одуд (*Upupa epops*), синиця велика (*Parus major*), сорокопуд жулан (*Lanius collurio*), жайворонок польовий (*Alauda arvensis*), горобець польовий (*Passer montanum*), плиска біла (*Motacilla alba*), куріпка сіра (*Perdix perdix*), перепілка звичайна (*Coturnix coturnix*), фазан (*Phasianus colchicus*), бджолоїдка звичайна (*Merops apiaster*), жайворонок степовий (*Melanocorypha calandra*), фіфі (*Tringa glareola*), коловодник звичайний (*Tringa totanus*), перевізник звичайний (*Actitis hypoleucos*), канюк звичайний (*Buteo buteo*), лунь болотяний (*Circus aeruginosus*), боривітер звичайний (*Cerchneis tinnunculus*), чеглок (*Hypotriorchis subbuteo*), лунь польовий (*Circus cyaneus*) та орлан-білохвіст (*Haliaeetus albicilla*). Серед перелічених птахів, останні два види занесені до Червоної книги України [5,6].

З ссавців на обстеженій території виявлені окремі особини та сліди життєдіяльності: миші хатньої (*Mus musculus*), миші-крихітки (*Micromys minutus*), мишака жовтогрудого (*Sylviaetus flavicollis*), нориці водяної (*Arvicola amphibius*), ондатри (*Ondatra zibethicus*), їжака європейського (*Erinaceus europaeus*), вивірки

звичайної (*Sciurus vulgaris*), куниці кам'яної (*Martes foina*), білозубки білочеревої (*Crocidura leucodon*), полівки звичайної (*Microtus arvalis*), сарни європейської (*Capreolus capreolus*), зайця сірого (*Lepus europaeus*), лисиці звичайної (*Vulpes vulpes*), свині дикої (*Sus scrofa*), борсука європейського (*Meles meles*). Такі види, як миша-крихітка, борсук європейський включені до «Переліку видів судинних рослин і тварин, які підлягають особливій охороні на території Кіровоградської області» (2018).

Головні висновки.

Реалізація положень Закону України «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року» можливе за умови інтенсифікації робіт зі створення нових та розширення існуючих територій та об'єктів природно-заповідного фонду.

Проведеними дослідженнями встановлено актуальний стан збереження природних біоценозів, що розташовуються на схід від м. Світловодськ, а також зазначено видову різноманітність рослинного і тваринного світу цих територій.

В межах проєктованої природоохоронної території виявлено існування видів, що занесені до Червоної книги України, а саме: плодоріжка болотна (*Orchis palustris*), поліксена (*Zerynthia polyxena*), ксилокопа фіолетова (*Xylocopa violacea*), дозорець-імператор (*Anax imperator*), ящірка зелена (*Lacerta viridis*), гадюка степова (*Vipera renardi*), лунь польовий (*Circus cyaneus*) та орлан-білохвіст (*Haliaeetus albicilla*).

Обстежені території мають високу природоохоронну цінність та потребують охорони, оскільки під впливом господарської діяльності людини вони поступово деградує.

Перспективи використання результатів дослідження.

Враховуючи значну видову різноманітність та існування на обстеженій території видів тварин та рослин, що занесені до Червоної книги України, створення об'єкту природно-заповідного фонду України зі статусом ландшафтного заказника загальнодержавного значення матиме важливе значення для збереження біологічного та ландшафтного різноманіття регіону.

Розроблене клопотання про створення ландшафтного заказника загальнодержавного значення «Заплава Дніпра» було схвалено Міністерством захисту довкілля та природних ресурсів у 2023 р. Про те відсутність погодження власників та користувачів земель, які входять в проєктований заказник, складають перешкоди щодо подальшого його створення.

Література

1. Закон України «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року» URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text>
2. Кременчуцькі плавні – проєктований регіональний ландшафтний парк Полтавщини / Т.Л. Андрієнко та ін. Захист довкілля від техногенного впливу. Зб. Наукових праць. Кременчук, 1998. № 1 (2). С. 8-16.

3. Заповідні куточки Кіровоградської землі / за ред. Т.Л. Андрієнко. Кіровоград: ТОВ «Імекс-ЛТД», 2008. 244 с.
4. Указ Президента України № 774/2008 від 27.08.2008 «Про невідкладні заходи щодо розширення мережі національних природних парків». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/774/2008#Text>
5. Червона книга України/ за ред. Я. П. Дідуха. Київ: Глобалконсалтинг, 2009. 900 с.
6. Про затвердження переліків видів тварин, що заносяться до Червоної книги України (тваринний світ), та видів тварин, що виключені з Червоної книги України (тваринний світ): Наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України 19 січня 2021 року № 29/ Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0260-21#Text>
7. Зелена книга України / за ред. Я.П. Дідуха. Київ: Альтерпрес, 2009. 448 с.

Дата першого надходження статті до видання: 26.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

ДИНАМІКА ПОКАЗНИКІВ БІОРІЗНОМАНІТТЯ УГРУПОВАНЬ NOCTUOIDEA (LEPIDOPTERA) УРБООЕКОСИСТЕМИ ТА ПРИМІСЬКОЇ ЗОНИ М. ЖИТОМИР

Ковтун Т.І.

Поліський національний університет
Старий бульв., 7, 10008, м. Житомир
igkov@ukr.net

Зміни показників біорізноманіття є важливим індикатором стану трансформованих екосистем. Совкоподібні метелики, завдяки своїй високій чисельності та видовому різноманіттю, мають переваги у проведенні досліджень біорізноманіття. Метою даного дослідження був порівняльний аналіз індексів біорізноманіття комплексів Noctuoidea приміської зони та урбо-екосистеми м. Житомир. Збір матеріалів проводили протягом польових сезонів 2019-2025 років, двічі на місяць, за допомогою світлових пасток. В умовах приміської зони Житомира всього зібрано 3082 екземпляри комах, які є представниками 3 родин, 22 підродин та 125 видів. В районі зборів урбоекосистеми Житомира зібрано 1648 екземплярів метеликів з 3 родин, 16 підродин та 81 виду. Встановлено, що річні зміни кількості видів та чисельності комплексів Noctuoidea на досліджуваних ділянках є, в значній мірі, синхронними. Розраховані середні значення індексів видового багатства: індексу Маргалефа (10,20 – для приміської зони та 6,99 – в умовах урбоекосистеми); індексу Менхініка (3,03 – для приміської зони та 2,57 – в умовах урбо-екосистеми). Виявлено дуже значну різницю між значеннями індексу Маргалефа ($P < 0,01$) та значну різницю для індексу Менхініка ($P < 0,05$). Це свідчить про суттєве зниження видового багатства угруповань Noctuoidea в умовах урбоекосистеми Житомира. Розраховані середні значення індексу різноманітності Шеннона-Вінера (3,61 – для приміської зони та 3,08 – в умовах урбоекосистеми). Виявлено дуже значну різницю для даного показника ($P < 0,01$). Аналіз індексу Шеннона-Вінера вказує на відносно високий рівень видового біорізноманіття популяцій Noctuoidea досліджуваних екосистем. Порівняння середніх значень індексу вирівняності (0,88 – для приміської зони та 0,84 – в умовах урбоекосистеми) вказує на відсутність суттєвої різниці між ними. Отримані значення індексу вирівняності свідчать про те, що угруповання Noctuoidea є достатньо збалансованими на обох досліджуваних територіях. Результати дослідження допомагають краще зрозуміти динаміку розвитку трансформованих екосистем, приймати обґрунтовані рішення щодо їх захисту. *Ключові слова:* індекс видового багатства Маргалефа; індекс видового багатства Менхініка; показник різноманітності Шеннона-Вінера; показник вирівняності (за Пієлу).

Dynamics of biodiversity indicators of Noctuoidea (Lepidoptera) group of Zhytomyr's urban and suburban ecosystems. Kovtun T.

Changes in biodiversity indicators are an important indicator of the condition of transformed ecosystems. Noctuoidea, due to their high abundance and species diversity, have advantages in conducting biodiversity researches. The purpose of this study was a comparative analysis of biodiversity indicators of Noctuoidea (Lepidoptera) group of Zhytomyr's urban and suburban ecosystems. Material collection was carried out during the 2019-2025 field seasons, twice a month, using light traps. In the suburban area of Zhytomyr, a total of 3082 specimens of insects were collected, representing 3 families, 22 subfamilies, and 125 species. In the area of the Zhytomyr urban ecosystem collection, 1648 specimens of butterflies from 3 families, 16 subfamilies, and 81 species were collected. It was found that annual changes in the number of species and the abundance of Noctuoidea complexes in the studied areas are, to a large extent, synchronous. The average values of the species richness indices were calculated: Margalef index (10,20 – for the suburban zone and 6.99 – in the urban ecosystem); Menkhinik index (3,03 – for the suburban zone and 2,57 – in the urban ecosystem). A highly significant difference was revealed between the values of the Margalef index ($P < 0.01$) and a significant difference for the Menkhinik index ($P < 0.05$). This indicates a significant reduction in the species richness of Noctuoidea communities in the urban ecosystem of Zhytomyr. The average values of the Shannon-Wiener diversity index were calculated (3,61 for the suburban zone and 3,08 for the urban ecosystem). A highly significant difference for this indicator was identified ($P < 0.01$). Analysis of the Shannon-Wiener index indicates a relatively high level of species biodiversity of Noctuoidea populations in the studied ecosystems. A comparison of the mean evenness index values (0,88 for the suburban area and 0,84 for the urban ecosystem) indicates the absence of a significant difference between them. The obtained evenness index values indicate that the Noctuoidea communities are sufficiently balanced in both study areas. The results of the study contribute to a better understanding of the dynamics of transformed ecosystems and facilitate informed decision-making regarding their protection. *Key words:* Margalef's richness index, Menhinick's richness index, Shannon-Wiener diversity index, Pielou's evenness index.

Постановка проблеми. Аналіз показників видового різноманіття є важливою складовою моніторингу стану екосистем з різним ступенем антропогенного навантаження. Адже значення показників

біорізноманіття є свідченням збалансованості та стійкості даної екосистеми. Совкоподібні метелики є екологічно важливою групою комах та виступають потенційними індикаторами змін у різних екосисте-



мах, включаючи урбоекосистеми та екосистеми приміської зони. Значне видове різноманіття даного таксону робить його найбільш придатним для аналізу динаміки показників біорізноманіття трансформованих екосистем [1].

Актуальність дослідження. Збереження та відновлення біорізноманіття є актуальним як, в цілому, у світі, так і в Україні. Визначення параметрів видового різноманіття угруповань ноктуїдофауни сприятиме кращому розумінню процесів трансформації, що відбуваються в урбоекосистемах та екосистемах приміських зон.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Локальні дослідження показників біорізноманіття комплексів Noctuoidea дозволяють оцінити рівень збалансованості досліджуваних екосистем та розробити обґрунтовані практичні заходи захисту совкоподібних на територіях з різним рівнем антропогенного навантаження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вирішення проблеми збереження та відновлення біорізноманіття здійснюється шляхом проведення численних наукових досліджень. В умовах урбоекосистем та приміських зон створюються додаткові ризики для збереження та відновлення видового різноманіття основних угруповань флори та фауни. Тому актуальними є дослідження, присвячені вивченню впливу урбанізації на біорізноманіття [2,3,4]; факторів, які визначають варіації біорізноманіття в межах міста [5]; закономірностей та механізмів міського біорізноманіття [6]; головних викликів для управління міськими зеленими зонами [7]; особливостей видового багатства окремих таксонів у напівприродних луках [8].

Комахи (Insecta) є однією із визначальних складових будь-якої екосистеми. Варто відмітити роботи вітчизняних науковців, присвячені дослідженню екологічної функції ентомологічного біорізноманіття [9]; видового різноманіття комах в агроценозах України [10].

Важливою складовою подібних досліджень є вивчення проблем біорізноманіття лускокрилих комах (Lepidoptera). Численні роботи розкривають як загальні аспекти даної проблеми [11,12,13], так і регіональні дослідження видового різноманіття Lepidoptera в США [14], Італії [15], Монголії [16], Китаї [17], Індії [18].

Для проведення наших досліджень важливим був аналіз робіт, присвячених визначенню показників біорізноманіття угруповань Noctuoidea України [19], Ірану [20], Японії [1], Індії [21], Китаю [22].

Насамкінець, слід відмітити, що дана робота є продовженням наших досліджень, присвячених аналізу екологічної структури угруповань совкоподібних урбоекосистем та приміської зони м. Житомир [23].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена

стаття. Мета дослідження полягає у проведенні порівняльного аналізу показників біологічного різноманіття комплексів Noctuoidea (Lepidoptera) урбоекосистем та приміської зони м. Житомир. Задля цього необхідно вирішити наступні завдання: 1) аналіз річної динаміки ідентифікованої кількості видів та загальної чисельності ноктуїдокомплексів обраних ділянок; 2) розрахунок та аналіз показників видового багатства: індексу Маргалефа та індексу Менхінка; 3) розрахунок та аналіз показника різноманітності Шеннона-Вінера; 4) розрахунок та аналіз показника вирівняності (за Пієлу).

Новизна. Виконано порівняльний аналіз показників біологічного різноманіття комплексів Noctuoidea (Lepidoptera) урбоекосистем та приміської зони м. Житомир.

Методологічне або загальнонаукове значення. Результати дослідження доповнюють відомості щодо показників видового різноманіття угруповань Noctuoidea (Lepidoptera) трансформованих екосистем.

Матеріали та методи дослідження. Спостереження за совкоподібними метеликами проводились з травня по жовтень 2019-2025 років. Було обрано дві ділянки: 1) ділянка № 1 знаходиться на території с. Березівка, Житомирського району, Житомирської області в приміській зоні м. Житомир (50°18'44"N 28°25'3"E) (рис. 1а); 2) ділянка № 2 розташована в південно-східній частині м. Житомир (50°25'38.97"N 25°68'57.50"E) (рис. 1б).

Ділянка № 1 характеризується наявністю індивідуальних городів; садів; пасовищ; ділянок з інтенсивним лісовідновленням, що обумовлено припиненням сільськогосподарської діяльності на них; полях захисної смуги; частково заболоченого багна. Таким чином, ділянка № 1, являє собою набір характерних для приміської зони біотопів природного, напівприродного та штучного походження з характерною рослинністю.

Ділянка № 2, розташована в межах урбоекосистем м. Житомир, містить біотопи антропогенного походження (сади, городи, присадибні ділянки) з набором характерних трав'яних, чагарникових та деревних рослин.

Збори проводили двічі на місяць у ясну погоду від заходу сонця до півночі. Метеликів збирали за допомогою світлових пасток, оснащених газорозрядною металогалогенною лампою Philips потужністю 400W. На кожній ділянці встановили одну світлову пастку. Камеральна обробка матеріалу проводилась за загальноприйнятими методиками [24]. Для визначення комах використовували 13-ти томне видання Noctuidae Europaeae, 1990-2011. Зібрані зразки збережені як особиста колекція Т. Ковтун.

Методи вимірювання компонентів біологічного різноманіття, які використовувались в нашому дослідженні, наведені в численних наукових публікаціях [25,26].



Рис. 1. Карта-схема розташування ділянки № 1 (а) та ділянки № 2 (б)

Формули розрахунку для кожного показника наступні:

Показник видового багатства (індекс Маргалефа):

$$d_1 = \frac{S-1}{\ln N} \quad (1)$$

Показник видового багатства (індекс Менхінка):

$$d_2 = \frac{S}{\sqrt{N}} \quad (2)$$

Показник різноманітності Шеннона-Вінера:

$$H_s = -\sum_{i=1}^s \left(\frac{n_i}{N} \right) \ln \left(\frac{n_i}{N} \right) \quad (3)$$

Показник вирівняності (за Піелу):

$$E = \frac{H_s}{\ln S} \quad (4)$$

У наведених формулах: n_i – кількість особин i -го виду; N – загальна кількість особин усіх видів; S – кількість видів.

Для проведення статистичної обробки матеріалів використовували наступні програмні продукти: Microsoft Excel 2016 та Statistika 7. Різниця в індексах біорізноманіття на досліджуваних ділянках розраховані за допомогою t -критерію Стьюдента для неза-

лежних вибірок за допомогою онлайн-калькулятора Стьюдента.

Викладення основного матеріалу. Впродовж польових сезонів 2019-2025 років у досліджуваному районі зібрано всього 4730 екземплярів Noctuoidea: із них на ділянці № 1 виявлено 3082 екземпляри метеликів з 3 родин, 22 підродин та 125 видів; на ділянці № 2 – 1648 екземпляри комах з 3 родин, 16 підродин та 81 виду.

Початковим етапом досліджень був аналіз річної динаміки ідентифікованої кількості видів та загальної чисельності ноктуїдокомплексів обраних ділянок (табл.).

Впродовж досліджуваного періоду спостерігається суттєве зниження, як загальної кількості видів, так і чисельності угруповань совкоподібних на ділянці № 2, в умовах урбоценозу. Максимальних значень згадані параметри набували на досліджуваних ділянках в 2021 році, а мінімальні значення відмічені в 2019 році (якщо не брати до уваги 2022 рік, коли були об'єктивні труднощі зі зборами матеріалів).

З метою виявлення статистично значущих відмінностей видової різноманітності угруповань совкоподібних досліджуваних ділянок ми розраховували індекси біорізноманіття, які найчастіше вико-

Таблиця

Кількість видів (S) та чисельність комплексу Noctuoidea (N) досліджуваних ділянок

Роки	Ділянка № 1		Ділянка № 2	
	S	N	S	N
2019	51	327	24	127
2020	56	290	40	302
2021	80	634	48	339
2022	50	296	35	225
2023	66	449	42	243
2024	65	503	48	220
2025	73	583	37	192
Середнє значення	$63 \pm 11,28$	$440,28 \pm 140,32$	$39,14 \pm 8,34$	$235,43 \pm 69,77$

ристовують для чисельної оцінки видового багатства та вирівняності розподілу особин між ідентифікованими видами певного біоценозу.

Першим був розрахований індекс видового багатства Маргалефа (рис. 2). Встановлено перевищення значень даного індексу на ділянці № 1 впродовж всього періоду досліджень. Найбільша різниця значень індексу Маргалефа зафіксована у 2021 році – 34,2%. Розрахунок t-критерію Стюдента виявив дуже значну статистично значущу відмінність середніх значень даного індексу ($P < 0,01$) для досліджуваних ентомокомплексів.

Наступним ми розраховували індекс видового багатства Менхінника (рис. 3). Варто відмітити, що для даного показника не спостерігається єдиної тенденції перевищення його значень на ділянці № 1. У 2024 році він був вищим на ділянці № 2. Разом

з тим, аналіз значення t-критерію Стюдента свідчить про значну статистично значущу відмінність ($P < 0,05$) між середніми значеннями даного індексу досліджуваних угруповань совкоподібних.

На наступному етапі досліджень був розрахований показник різноманітності Шеннона-Вінера (рис. 4). Аналіз значень даного показника вказує на загальний високий рівень видового біорізноманіття популяцій нічних метеликів на досліджуваних територіях. Адже значення H' вище 3 зазвичай вказують на задовільний рівень біорізноманіття [26]. Разом з тим, встановлено, що впродовж 2019-2025 років показник різноманіття був вищим на ділянці № 1. t-критерій Стюдента вказує на дуже значну статистично значущу відмінність між середніми значеннями індексу Шеннона-Вінера досліджуваних ділянок ($P < 0,01$).

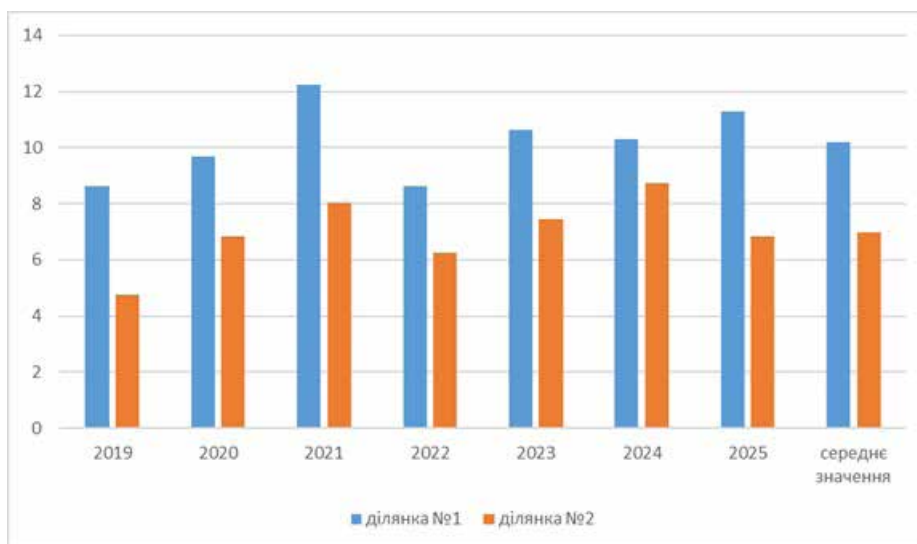


Рис. 2. Порівняння індексу видового багатства Маргалефа угруповань *Nostuoidea* досліджуваних ділянок

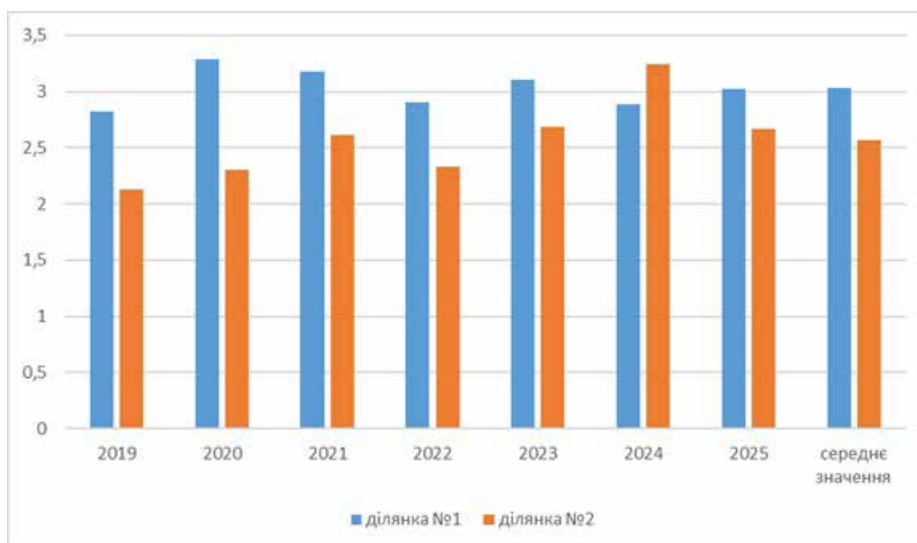


Рис. 3. Порівняння індексу видового багатства Менхінника угруповань *Nostuoidea* досліджуваних ділянок

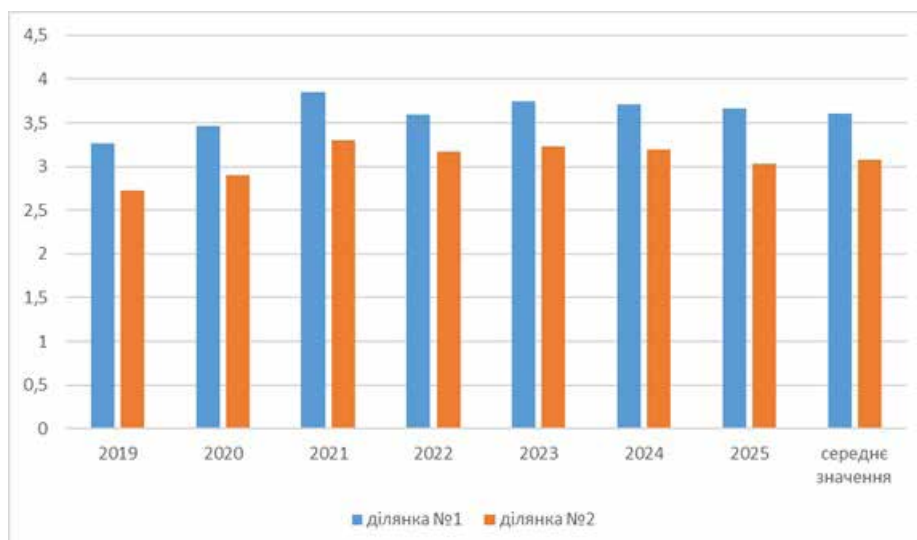


Рис. 4. Порівняння індексу різноманітності Шеннона-Вінера угруповань *Noctuoidea* досліджуваних ділянок

Насамкінець, був розрахований показник вирівняності (за Піелу) (рис. 5). По-перше, слід відмітити, що значення даного індексу демонструють найбільшу волатильність серед усіх розрахованих індексів біорізноманіття. Окрім того, на фоні загального перевищення значення індексу вирівняності на ділянці № 1 впродовж досліджуваного періоду, у 2019 році даний індекс був вищим на ділянці № 2. Середні значення даного показника (0,88 – на ділянці № 1 та 0,84 – на ділянці № 2) свідчать про високу рівномірність розподілу особин метеликів між ідентифікованими видами на обох ділянках. Водночас аналіз t-критерію Стюдента не виявив статистично значимих відмінностей між середніми значеннями показника вирівняності досліджуваних ділянок.

Головні висновки. Аналіз річної динаміки зафіксованої кількості видів та загальної чисельності комплексів *Noctuoidea* виявив синхронність подіб-

них змін на обох досліджуваних ділянках, яка вказує на те, що крім факторів антропогенного та техногенного тиску, на різноманітність популяцій *Noctuoidea* суттєвий вплив можуть мати інші фактори, наприклад, погодні умови, які були найбільш сприятливими у 2021 році.

Розраховані показники видового багатства свідчать про те, що ноктуїдокомплекс приміської зони складається із суттєво більшої кількості видів в порівнянні з угрупованням *Noctuoidea* урбоєкосистеми м. Житомир.

В умовах приміської зони видове різноманіття совкоподібних є дещо вищим в порівнянні з угрупованнями *Noctuoidea* урбоєкосистеми м. Житомир. Разом з тим, загальний рівень значень даного індексу вказує на те, що видове біорізноманіття угруповань совкоподібних обох досліджуваних ділянок знаходиться на задовільному рівні.

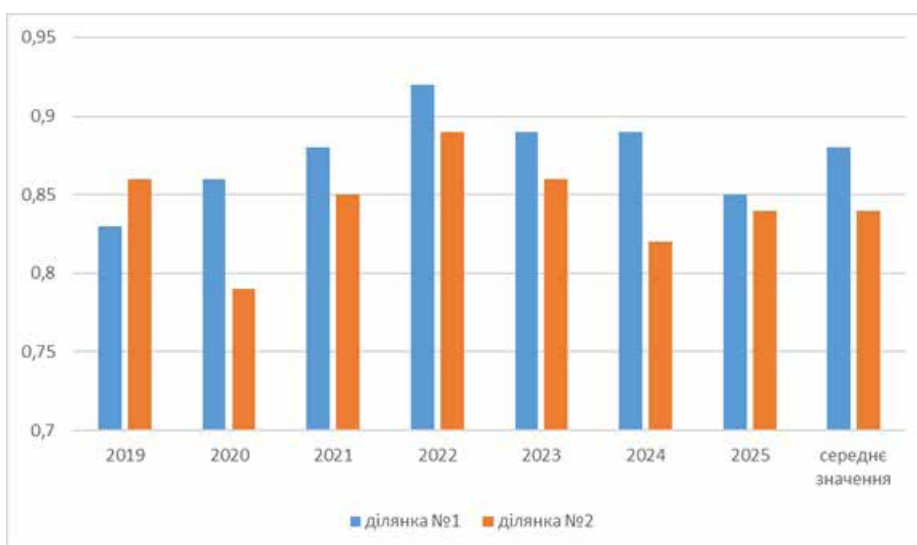


Рис. 5. Порівняння показника вирівняності (за Піелу) угруповань *Noctuoidea* досліджуваних ділянок

Отримані значення показника вирівняності свідчать, що, незважаючи на відмічені значимі відмінності у видовому багатстві та видовій різноманітності, в умовах приміської зони та урбоєкосистеми м. Житомир сформувались збалансовані угруповання совкоподібних, стійкі до змін факторів навколишнього середовища, характерних для подібних трансформованих екосистем.

Отже, значення показників видового біорізноманіття дозволяють стверджувати, що совкопо-

дібні (Noctuoidea) є групою лускокрилих комах (Lepidoptera), яка здатна формувати збалансовані ентомоценози, пристосовані до існування в умовах трансформованих екосистем.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати є важливою складовою комплексного наукового дослідження механізмів формування екологічних комплексів ноctuїдних лускокрилих (Lepidoptera, Noctuoidea) в умовах Житомирщини, яке буде продовжено.

Література

1. Kamikura M., Sakata Y. Fauna of nocturnal moth species collected in a semi-natural grassland at Kanpu-zan in northern Japan. *Biodiversity Data Journal*. 2019. Vol. 7. DOI: <https://doi.org/10.3897/bdj.7.e37968>.
2. Concepción E.D., Moretti M., Altermatt F., Nobis M.P., Obrist M.K. Impacts of urbanisation on biodiversity: the role of species mobility, degree of specialisation and spatial scale. *Oikos*. 2015. Vol. 124. P. 1571–1582. DOI: <https://doi.org/10.1111/oik.02166>.
3. Kowarik I., Lippe M. Plant population success across urban ecosystems: a framework to inform biodiversity conservation in cities. *Journal of Applied Ecology*. 2018. Vol. 55. P. 2354–2361. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13144>.
4. Knapp S., Kuhn I., Schweiger O., Klotz S. Challenging urban species diversity: contrasting phylogenetic patterns across plant functional groups in Germany. *Ecology Letters*. 2008. Vol. 11. P. 1054–1064. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01217.x>.
5. Beninde J., Veith M., Hochkirch A. Biodiversity in cities needs space: a meta-analysis of factors determining intra-urban biodiversity variation. *Ecology Letters*. 2015. Vol. 18. P. 581–592. DOI: [doi:10.1111/ele.12427](https://doi.org/10.1111/ele.12427).
6. Faeth S.H., Bang C., Saari S. 2011 Urban biodiversity: patterns and mechanisms. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 2011. Vol. 1223. P. 69–81. DOI: [doi:10.1111/j.1749-6632.2010.05925.x](https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2010.05925.x).
7. Aronson M.F., Lepczyk C.A., Evans K.L., Goddard M.A., Lerman S.B., MacIvor J.S., Nilon C.H., Vargo T. Biodiversity in the city: key challenges for urban green space management. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2017. Vol. 15. P. 189–196. DOI: <https://doi.org/10.1002/fee.1480>.
8. Vessby K., Soderstrom B., Glimskar A., Svensson B. Species-richness correlations of six different taxa in Swedish seminatural grasslands. *Conserv. Biol.* 2002. Vol. 16. P. 430–439.
9. Екологічна функція ентомологічного біорізноманіття. Фауна комах-фітофагів деревних і чагарникових насаджень Лісостепу України: монографія / за ред. М. М. Лісовий, В. М. Чайка. Кам'янець-Подільський: Аксіома, 2008. 384 с.
10. Стовбчатий В. М. Видове різноманіття комах (Insecta) в агроценозах України (експертна оцінка). Агробіорізноманіття України: теорія, методологія, індикатори, приклади. Книга 2. Київ: ЗАТ «Нічлава», 2005. 592 с.
11. Aagaard K., Berggren K., Hebert P.D., Sones J., McClenaghan B., Ekrem T. Investigating suburban micromoth diversity using DNA barcoding of malaise trap samples. *Urban Ecosystem*. 2017. Vol. 20, P. 353–361. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11252-016-0597-2>.
12. An J.S., Choi S.W. Forest moth assemblages as indicators of biodiversity and environmental quality in a temperate deciduous forest. *Eur. J. Entomol.* 2013. Vol. 110, No. 3. P. 509–517. DOI: [10.14411/eje.2013.067](https://doi.org/10.14411/eje.2013.067).
13. Matos da Costa J., Sielezniew M. Guild structure in assemblages of forest macro-moths is maintained regardless of the level of anthropogenic disturbance. *The European Zoological Journal*, 2025. Vol. 92(1). P. 935–948. DOI: <https://doi.org/10.1080/24750263.2025.2539833>.
14. Downer R., Ebert T. Macrolepidoptera biodiversity in Wooster, Ohio from 2001 through 2009. *ZooKeys*. 2014. Vol. 452. P. 79–105. DOI: <https://doi.org/10.3897/zookeys.452.8009>.
15. Macro-moth (Lepidoptera) diversity of a newly shaped ecological corridor and the surrounding forest area in the Western Italian Alps / I. Piccini et al. *Diversity*. 2023. Vol. 15(1). P. 95. DOI: <https://doi.org/10.3390/d15010095>.
16. Alpha and beta diversity patterns of macro-moths reveal a breakpoint along a latitudinal gradient in Mongolia / K. Enkhtur et al. *Scientific reports*. 2021. Vol. 11, No. 1. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94471-3>.
17. Guo X., Zhang K., Zhou T., Hu Y., Sun X., Li K. Characteristics of moth community in different types of urban forest Plantations in Beijing, Chinese. *Journal of ecology*. 2022. Vol. 41. P. 316 – 323. DOI: <https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.202201.013>.
18. Dar A., Jamal K., Alhazmi A., El-Sharnouby M., Salah M., Sayed M. Moth diversity, species composition, and distributional pattern in Aravalli Hill Range of Rajasthan, India. *Saudi journal of biological sciences*. 2021. Vol. 28. P. 4884–4890. DOI: [10.1016/j.sjbs.2021.06.018](https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.06.018).
19. Біологічне різноманіття України. Дніпропетровська область. Вищі різновусі лускокрилі. Частина 2. Совки (Lepidoptera: Noctuidae) / З. Ф. Ключко та ін.; за заг. ред. проф. О. Є. Пахомова. Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту, 2011. 546 с.
20. Rabieh M.M. Biodiversity of noctuid moths (Lepidoptera: Noctuidae) in the agroecosystems of Mashhad County. *Biodiversity Int. J.* 2018. Vol. 2(2). P. 147–151. DOI: [10.15406/bij.2018.02.00057](https://doi.org/10.15406/bij.2018.02.00057).
21. Kumar P., Thakur M. Biodiversity and habitat association of noctuid moths (Lepidoptera: Noctuidae) in various chirpine forests of Himachal Pradesh. *International journal of basic and applied scientific aspects*. 2015. Vol. 2. P. 46–54.
22. Xu S., Yang Y., Yu Q., Zhi X., Guo S., An L., Wang B. Moth diversity and dominant species niches in cherry orchards under light-trap in the Loess Plateau of Eastern Gansu, China. *Preprints*. 2025. 2025122706. DOI: <https://doi.org/10.20944/preprints202512.2706.v1>.

23. Ковтун Т.І. Еколого-фауністична характеристика угруповань Noctuoidea (Lepidoptera) приміської зони та урбоєкосистеми м. Житомир. *Екологічні науки*. 2025. № 1 (58). С. 100-106. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.1-58.17>.
24. Oseto C., Gibb T. J. Arthropod collection and identification: laboratory and field techniques. Elsevier Science & Technology Books, 2010. 336 p.
25. Odum E. P. Basic ecology: fundamentals of ecology. Philadelphia, Pa: Holt-Saunders International, 1983. 376 p.
26. Magurran A. E. Measuring biological diversity. Maldan, MA: Blackwell Pub., 2004. 256 p.

Дата першого надходження статті до видання: 19.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

ПОПУЛЯЦІЙНА ДИНАМІКА РІДКІСНИХ ВИДІВ У КОНТЕКСТІ АНТРОПОГЕННОГО ТИСКУ

Луцюк Т.М., Колодій В.А., Гордій Н.М.

Кам'янець-Подільський університет імені Івана Огієнка
вул. Огієнка, 61, 32301, м. Кам'янець-Подільський
kolodiyva@ukr.net, nataliagordiy3103@gmail.com

Прямий та непрямий антропогенний вплив на природне середовище призводить до динаміки видової популяції динаміка рідкісних представників флори і фауни, зумовлює скорочення чисельності та деструктивних змін у структурі популяцій, слугує причиною фрагментації ареалів. На сьогодні військові дії, спричинені агресією росії та повномасштабним її вторгненням до України, підсилюють руйнівний антропогенний тиск на видове різноманіття. Метою статті є аналіз основних екологічних проблем у сфері популяційної динаміки рідкісних видів під антропогенним впливом. У дослідженні актуалізовано необхідність налагодження системи моніторингу та оцінки екологічних загроз для біорізноманіття, а також пошук шляхів захисту рідкісних видів на регіональному та локальному рівнях. У статті розглянуто специфіку популяційної динаміки рідкісних представників біорізноманіття у регіонах України, що зазнали максимального деструктивного впливу активних бойових дій, виявлено актуальні екологічні загрози для окремих ендемічних видів флори і фауни. Встановлено, що масові пожежі в лісових масивах, механічні пошкодження ґрунтового покриву та його хімічне забруднення, незаконні вирубки створюють умови для критичного зниження лісистості, а також деградацію водоохоронних, ґрунтозахисних та рекреаційних функцій екосистем, що негативно впливає на чисельність популяцій. Запропоновані основні заходи з оптимізації екологічної ситуації на локальному рівні, а також превентивні міри для запобігання масштабній екологічній катастрофі. Практична значимість отриманих результатів полягає в можливості їх використання для моніторингових досліджень стану екосистем та популяцій рідкісних видів у період військового часу та у процесі формування комплексного підходу до захисту та регенерації ендемічних популяцій у післявоєнний період. *Ключові слова:* рідкісні види, ендемічні види, загроза довкіллю, моніторинг, біорізноманіття, потенційні ризики, популяція, динаміка, антропогенне навантаження.

Population dynamics of rare species in the context of anthropogenic pressure. Lutsiuk T., Kolodii V., Hordii N.

Environmental pollution and depletion of some of its resources due to prolonged irrational use lead to undesirable environmental consequences for landscape ecosystems. The low threshold of natural resistance of biodiversity to rapid degradation under anthropogenic pressure is due to a narrow homeostatic range, the specific nature of its natural resource potential and limited adaptive capabilities. Natural restoration requires a significant time resource, is characterized by uncontrollability and significant dependence on associated environmental factors. The aim of the work was to study the main ecological problems in the field of population dynamics of rare species under anthropogenic influence, to predict the scale of negative consequences for biodiversity during wartime in order to develop an effective system of management decisions. The research focuses on proving the destructive impact of active armed conflict on the gene pool of flora and fauna of both Ukraine and the European continent as a whole. The article examines the specifics of the population dynamics of rare representatives of biodiversity in the regions of Ukraine that have experienced the maximum destructive impact of active hostilities, and identifies current environmental threats to individual endemic species of flora and fauna. The priority vector for optimizing the management system for the population dynamics of rare species is the formation of vertically integrated associations of environmentally oriented business entities, the establishment of an effective system for monitoring and evaluating the effectiveness of implemented measures, and the improvement of practices in the areas of data standardization, ontology, analytics, and integrated databases. *Key words:* rare species, endemic species, environmental threat, monitoring, biodiversity, potential risks, population, dynamics, anthropogenic load.

Постановка проблеми. Рідкісні види у середовищі природного розвитку безперервно зазнають прямого чи опосередкованого впливу антропогенних чинників, котрі детермінують стан популяцій, змінюючи показники чисельності, міграції та сезонних переміщень, рівня стійкості до захворюваності, ареалу поширення тощо. Забруднення довкілля та виснаження окремих його ресурсів внаслідок тривалого нерационального використання призводять до небажаних екологічних наслідків для ландшафтних екосистем. Низький поріг природної стійкості біорізноманіття до стрімкої деградації під антропогенним тиском зумовлений вузьким гомеостатичним діапа-

зоном, специфічним характером її природно-ресурсного потенціалу та обмеженими адаптивними можливостями. На природне відновлення необхідний значний часовий ресурс, йому характерна неконтрольованість та значна залежність від супутніх факторів навколишнього середовища.

Актуальність дослідження. Зважаючи на пролонгований вплив деструктивних чинників війни на екосистеми в Україні, виникає нагальна потреба у пошуку ефективних способів регулювання динаміки популяцій рідкісних видів. Екологічна катастрофа у низці регіонів зумовлює необхідність активного дослідження специфіки впливу антропо-



погенного тиску на біорізноманіття та популяційну динаміку рідкісних видів флори та фауни.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Нечисленні актуальні наукові публікації та теоретико-методологічні розробки присвячені дослідженню популяційної динаміки рідкісних видів в умовах антропогенного тиску військового часу. Здебільшого, сучасний науковий дискурс в даній галузі зосереджений на стійкості екосистем у контексті глобальних змін клімату, підвищенні еколого-економічної ефективності природо-заповідного фонду та ощадливому господарському використанню ландшафтів. Разом з тим, питання збереження популяцій рідкісних видів на тлі тривалого деструктивного впливу війни залишається невирішеним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Результати нещодавніх досліджень сучасних вчених на чолі з Лісовою Н. [1], Роман Л. [2] переконливо демонструють небезпечні зміни у стані водних об'єктів як основи збалансованого розвитку екосистем. Трофимчук О. та ін. [3] акцентують у своїх публікаціях, що різке зростання рівня забруднення навколишнього середовища внаслідок бомбардувань і масштабних пожеж викликає суттєві зміни в регіональних екосистемах, подекуди – незворотного характеру дії, що безпосередньо впливає на популяції рідкісних та ендемічних видів.

Сучасні дослідники Зима І. та ін. [4], Шейгас І. [5] розглядають наслідки впливу військових дій на екосистеми та об'єкти природо-заповідного фонду України, акцентуючи на низькій ефективності занесення рідкісних видів у Червону книгу, висвітлюючи особливості нормативно-правової ситуації, що склалася в екологічній сфері України в умовах російської військової окупації. В той же час, вчені Pereira P. та ін. [6], Rawtani D. та ін. [7] акцентують увагу на значенні міжнародної політично-правової спільноти у процесі попередження та ліквідації негативних наслідків для довкілля та біорізноманіття зокрема, з огляду на глобальні кліматичні процеси під антропогенним тиском.

Lewis J. та ін. [8], Abrahms B. [9] у нещодавніх наукових дослідженнях аналізували, як антропогенна діяльність впливає на популяції диких тварин та їхню активність, обґрунтовуючи доцільність використання сучасних можливостей геоінформаційних систем та супутникових даних для виявлення локацій пошкоджень територій та екосистем з метою своєчасної розробки оптимізаційних заходів.

Автори Sattar Q. та ін. [10], He X., Wei H. [11] виділяють ключові аспекти динаміки популяцій рідкісних видів, серед яких – фрагментація та більша ізолюваність популяцій, зменшення їх чисельності, що призводить до зменшення генетичного різноманіття та підвищення вразливості рідкісних видів, а також зміна структури – статевого складу, співвідношення вікових груп. Низкою вчених (Fukasawa K. та ін. [12],

Gée A. та ін. [13], Eikelboom J. та ін. [14]) запропоновано методи пасивної та активної охорони рідкісних видів, що включають розширення природно-заповідного фонду, реінтродукцію, системи моніторингу.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Відсутність повного та достовірного інформування щодо стану популяцій рідкісних видів на територіях України у часі війни зумовлює необхідність в моніторингу основних екологічних загроз для ендемічних на зникаючих представників флори і фауни. Збереження біорізноманіття є актуальним питанням, що потребує невідкладної розробки превентивних охоронних заходів та пошуку шляхів регенерації екосистем.

Новизна. У дослідженні запропоновано новий підхід до розуміння впливу антропогенних чинників на популяційну динаміку рідкісних видів у часі війни. Розглянуто нові підходи до збереження біорізноманіття, що поєднують міжнародний досвід та реалії української практики управління популяціями.

Методологічне або загальнонаукове значення. Метою роботи стало вивчення основних екологічних проблем у сфері популяційної динаміки рідкісних видів під антропогенним впливом, прогнозування масштабів негативних наслідків для біорізноманіття у часі війни для розробки ефективної системи управлінських рішень. Дослідження зосереджене на доведенні руйнівного впливу активного збройного конфлікту на генофонд флори та фауни як України, так і європейського континенту в цілому.

Виклад основного матеріалу. Генетична різноманітність є основою біологічної стабільності. Саме вона дозволяє видам адаптуватися до мінливих умов – зміни клімату, загроз та захворювань, що виникають під впливом антропогенної діяльності, слугуючи основою для дійсних та перспективних програм селекції, виведення нових сортів, корегування природоохоронної діяльності. Серед ключових аспектів антропогенного тиску на біорізноманіття – деградація середовища через знищення лісів, фрагментацію ареалів проживання, ізоляцію; пряме виснаження через споживацьке використання видів та відсутність належного природоохоронного захисту; забруднення; неконтрольовані процеси інвазії тощо.

Активні бойові дії порушують визначальні параметри середовища існування диких видів, в результаті чого відбувається їх вимирання або зміна ареалів поширення, що часто передбачає виживання в складних умовах додаткової конкуренції та боротьби. Зокрема, нестача необхідної їжі та безпечних домівок призводять до загибелі великої кількості тварин, в тому числі й ендемічних і рідкісних видів.

Наслідки активних військових дій впливають на всі складові регіональних та локальних екосистем. Внаслідок вибухів та детонації боєприпасів, аварійних ситуацій з вивільненням забруднюючих речовин якісні параметри води у водоймах та водотоках

значно знизилась, що порушує екологічну рівновагу взаємозв'язків у природних системах. Варто зауважити, що бойові дії, ініційовані російськими загарбниками, охопили площу близько третини всього природно-заповідного фонду України, що рівнозначно 1,2 млн га [15]. Як наслідок, значних втрат зазнають заповідники та національні природні парки (НПП). Під загрозою знищення на сьогодні опинилися 14 Рамсарських об'єктів площею 397,7 тис. га, біосферні заповідники (Чорноморський, Дунайський, «Асканія-Нова»), понад 200 територій Смарагдової мережі площею 2,9 млн га. Катастрофічні втрати земельних ресурсів характерні для ландшафтів природно-заповідного фонду степової, лісової, лісостепової природних зон, а також прибережних морських зон акваторій Чорного і Азовського морів [16].

Через терористичний акт росії на Каховській гідроелектростанції такі національні природні парки, як «Великий луг» та «Кам'янська січ», поступово перетворюються на пустелю [16]. Вода повністю знищила Нижньодніпровський НПП з усіма його мешканцями, площею 80 тис. га [16]. У парку, створеному для охорони об'єктів річки Дніпро як репрезентативного природного заплавно-літорального комплексу у Європі, мешкали тисячі видів птахів, комах, риб, молюсків, рідкісних видів рослин. Парк належить до Смарагдової мережі та має особливий статус міжнародної охорони.

На сьогодні деякі з таких ареалів рідкісних та ендемічних видів опинилися у зонах ведення активних військових дій [15]. Зокрема, цілинні нерозорані степові території, крейдяні схили Донеччини, приморські екосистеми у південній частині країни. Біологічне різноманіття української флори і фауни опинилось на межі вимирання. Вже сьогодні під загрозою зникнення перебувають окремі види, наприклад:

– *Thalictrum foetidum* L. – нові локалітети виявлено на території степової зони (околиці с.Львів, с. Богданівка В Миколаївській області на території НПП «Бузький Гард»), занесений до ЧКУ [17];

– *Bulbocodium versicolor* (Ker Gawl.) Spreng. в заповідній зоні НПП «Великий луг», що занесена до Червоної книги України [15];

– *Tulipa scythica* Klokov et Zoz, що є ендеміком степових ландшафтів території біосферного заповідника «Асканія-Нова» – даний вид давно перебуває на межі вимирання через нераціональну зміну водного режиму внаслідок господарської діяльності людини, а на даний час ситуація набула критично загрозливого характеру [2];

– *Stipa ucrainica* P. Smirn., *Tulipa schrenkii* Regel, *Salvia tesquicola* Klokov & Pobed., *Claucium flavum*, Crantz, *Crambe pontica* L.– із Азово-Сиваського НПП;

– *Dianthus bessarabicus* Klok., *Caldium mariscus* (L.) Pohl s.l., *Epipactis palustris* (L.) Crantz, *Aldrovanda vesiculosa* L., *Salvinia natans* (L.) All. – із Дунайського біосферного заповідника.

Щодо фауни, рідкісні види, що охоронялись в межах природоохоронних об'єктів, також опинились на межі зникнення:

– *Cervus nippon* L., *Grus virgo*, *Equus grevyi* Boddaert, *Sicista subtilis*, *Allactaga major*, *Tadorna ferruginea* – із біосферного заповідника «Асканія-Нова»;

– *Mustela erminea*, *Haliaeetus albicilla*, *Mustela lutreola* – з Дунайського біосферного заповідника;

– *Hieraaetus pennatus*, *Elaphe longissima*, *Lacerta viridis*, *Barbus borysthenticus*, *Aquila pomarina* – з національного природного парку «Бузький Гард».

На межі знищення знаходиться Регіональний ландшафтний парк «Кінбурнська коса», що є частиною Чорноморського біосферного заповідника: пожежі спалили 5 тис. га лісів, ерозія ґрунтового покриву спровокувала знищення рослинності, будівництво й споруд призвело до зникнення видового різноманіття фауни [2; 16]. Кінбурнська коса є територією гніздування багатьох рідкісних видів птахів, значна кількість яких занесені до Червоної книги. Тут ростуть рідкісні види рослин, зокрема, дикі орхідеї. Знищення Кінбурнської коси як заповідної території нестиме серйозні наслідки не лише для України, але й для всієї Європи. Адже птахи змінюють маршрути міграції та відмовляються від гніздування на косі, що неминуче призведе до зростання популяції комах та шкідників, що порушить баланс природної системи.

Збереження біорізноманіття – це не лише абстрактна вимога Євросоюзу чи передумова доступу до європейських ринків. Імплементация екологічних інновацій у практику біозбереження дозволить забезпечити довгостроковий вимір конкурентоспроможності та формування кліматично безпечного середовища господарювання [18]. Пріоритетним вектором оптимізації системи управління популяційною динамікою рідкісних видів є формування вертикально інтегрованих об'єднань екологічно орієнтованих суб'єктів господарювання, налагодження результативної системи моніторингу та оцінки ефективності імплементованих заходів, вдосконалення практик у галузях стандартизації даних, онтології, аналітики та інтегрованих баз даних [19].

Необхідними заходами щодо підтримки рідкісних, ендемічних та зникаючих видів вбачаються:

1) впровадження Національної стратегії збереження біорізноманіття комплементарно європейським вимогам, що має враховувати післявоєнні виклики та стати основою для довгострокової природоохоронної політики;

2) налагодження системного моніторингу стану біорізноманіття та динаміки популяцій рідкісних видів зокрема, що передбачає інформаційно-технічну підтримку здійснення заходів щодо захисту дикої природи для ефективного реагування на загрози;

3) регенерація екосистем;

4) гармонізація національного галузевого законодавства з європейськими нормами, що передбачає, серед іншого, інтеграцію Оселищної та Пташиної директив;

5) розширення потенціалу міжнародної взаємодії, коучингу та партнерства, координації зусиль між приватними, громадськими і державними структурами.

Головні висновки. Наразі спостерігається тенденція інтенсифікації антропогенного впливу на екосистеми, що зумовлює негативну динаміку популяцій рідкісних, зникаючих та ендемічних видів. Деструктивний вплив військового часу нівелює захисну роль діючого природоохоронного законодавства, ставлячи під загрозу існування цінного біорізноманіття у європейському масштабі. Особливий функціонал сьогодні належить інтеграції успішного міжнародного досвіду, розробці та впровадженню інноваційних методів моніторингу та геоінформаційних технологій. При цьому важлива роль відводиться залученню всього можливого інструментарію міжнародного нормативно-політичного впливу, розробці нових методів оцінки екологічних збитків.

У функціоналі подальших досліджень вбачається доцільним використання дієвих підходів до фіксації екологічних злочинів та системи стягнення відшкодування на відновлення екосистем природно-заповідного фонду України.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати дослідження зорієнтовані на можливість практичного застосування в процесі формування системи управління ризиками виникнення негативних наслідків для біорізноманіття України. Висновки, отримані в результаті роботи, пропонують адекватне розуміння екологічних наслідків війни для популяцій рідкісних видів в найбільшій європейській країні, впровадження системи ефективних моніторингових досліджень параметрів стану популяцій рідкісних видів України у воєнний період та моделювання комплексу превентивних мір та регенераційних заходів у післявоєнний час.

Література

1. Лісова Н. Вплив військових дій в Україні на екологічний стан території. *Наукові записки Тернопільського НПУ*. 2017. № 2. С. 165–172.
2. Роман Л. Аналіз екологічних загроз об'єктів ПЗФ України у воєнний період. *Екологічні науки*. 2022. № 3(42). С. 84–88.
3. Трофимчук О. М., Загородня С. А., Вишняков В. Ю., Клименко В. І., Шевякіна Н. А., Радчук І. В., Сластін С. О. Космічний моніторинг порушення стану екосистеми Чорноморського біосферного заповідника внаслідок військових дій. *Екологічна безпека та природокористування*. 2023. № 47(3). С. 94–112.
4. Зима І. С., Галанін Д. С., Старцев О. О. Шляхи удосконалення процесів управління популяціями хутрових звірів. *Галузі лісового господарства: матеріали II Всеукраїнської науково-практичної конференції до 205-річчя з дня народження ВС фон Граффа, м. Овруч-Малин, 08 лист. 2024 р. / Малинський фаховий коледж, 2024*. С. 85.
5. Шейгас І. М. Характеристика дії лімітуючих факторів на стан мисливського ресурсу України. *Theriologia Ukrainica*. 2021. Вип. 21. С. 141–151.
6. Pereira P., Bašić F., Bogunovic I., Barcelo D. Russian-Ukrainian war impacts the total environment. *Science of The Total Environment*. 2022. Vol. 837. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896972202962X>
7. Rawtani, D., Gupta, G., Khatni, N., Rao, P., Hussain, Ch. Environmental damages due to war in Ukraine: A perspective. *Science of The Total Environment*. 2022. Vol. 850. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969722050318>
8. Lewis J. S., Spaulding S., Swanson H., Keeley W., Gramza A. R., VandeWoude S., Crooks K. R. Human activity influences wildlife populations and activity patterns: implications for spatial and temporal refuges. *Ecosphere*. 2021. № 12(5). <https://doi.org/10.1002/ecs2.3487>
9. Abrahms B. Human-wildlife conflict under climate change. *Science*. 2021. № 373 (6554). Pp. 484–485. <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.abj4216>
10. Sattar Q., Maqbool M. E., Ehsan R., Akhtar S., Sattar Q., Maqbool M. E. Review on climate change and its effect on wildlife and ecosystem. *Open J Environ Biol*. 2021. № 6(1). Pp. 008–014.
11. He X., Wei H. Biodiversity conservation and ecological value of protected areas: A review of current situation and future prospects. *Frontiers in Ecology and Evolution*. 2023. № 11. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1261265>
12. Fukasawa K., Osada Y., Iijima H. Is harvest size a valid indirect measure of abundance for evaluating the population size of game animals using harvest-based estimation?. *Wildlife Biology*. 2020. Vol. 4. Pp. 1–7. <https://doi.org/10.2981/wlb.00708>
13. Gée A., Sarasa M., Pays O. Long-term variation of demographic parameters in four small game species in Europe: opportunities and limits to test for a global pattern. *Animal Biodiversity and Conservation*. 2018. Vol. 41(1). Pp. 33–60. <https://doi.org/10.32800/abc.2018.41.0033>
14. Eikelboom J. A., Wind J., Van de Ven E., Kenana L. M., Schroder B., De Knecht H. J., Prins H. H. Improving the precision and accuracy of animal population estimates with aerial image object detection. *Methods in Ecology and Evolution*. 2019. Vol. 10(11). Pp. 1875–1887. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13277>
15. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. URL: <https://mepr.gov.ua/>
16. Державна екологічна інспекція України. URL: <https://www.dei.gov.ua/>
17. Мойсієнко І. І., Винокуров Д. С., Ширяєва Д. В. (2021). *Thalictrum foetidum* L. у степовій зоні України: нові знахідки та еколого-ценотичні особливості. *Чорноморськ. бот. ж.*, 17 (1): 36–45. DOI: 10.32999/ksu1990-553X/2021-17-1-2
18. Pushak Y., Zaichenko V., Kornicheva H., Petrukha S., Kharabovskiy Y. Features of the impact of military actions on food security. *International Journal of Computer Science and Network Security*. 2022. Vol. 22(6). Pp. 33–38.
19. Mutillod C., Buisson É., Mahy G., Jaunatre R., Bullock J. M., Tatin L., Dutoit T. Ecological restoration and rewilding: two approaches with complementary goals? *Biological Reviews*. 2024. Vol. 99(3). Pp. 820–836. <https://doi.org/10.1111/brv.13046>

Дата першого надходження статті до видання: 10.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

ФІТОІНДИКАЦІЙНИЙ ПОТЕНЦІАЛ СИНАНТРОПНИХ ТРАВ'ЯНИСТИХ РОСЛИН В УРБАНІЗОВАНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Сікора В.І., Григорчук І.Д.

Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка
вул. Огієнка, 61, 32300, м. Кам'янець-Подільський
bioldf25.sikora@kpnu.edu.ua, hryhorchuk@kpnu.edu.ua

У статті здійснено комплексний теоретичний аналіз проблеми оцінки екологічного стану урбанізованого середовища методами фітоіндикації. В умовах зростаючого антропогенного навантаження, що супроводжується накопиченням у ґрунтах важких металів та інших ксенобіотиків, забрудненням атмосфери та водойм, трансформацією гідрологічного режиму та порушенням трофічних зв'язків, традиційні фізико-хімічні методи моніторингу потребують доповнення біологічними підходами діагностики. Обґрунтовано доцільність використання синантропних трав'янистих рослин як чутливого, доступного та інтегрального інструменту для оцінки якості довкілля. На основі системного аналізу вітчизняних та закордонних наукових джерел визначено ключові переваги використання видів-урбофілів, зокрема *Taraxacum officinale* Wigg. та *Plantago major* L., для моніторингу урбоєкосистем. Встановлено, що фітоіндикаційний потенціал цих видів базується на їхній високій екологічній пластичності, здатності акумулювати полутанти у вегетативних органах та чіткій фізіолого-біохімічній відповіді на стрес. Проаналізовано біохімічні механізми адаптації рослин до умов урбосередовища, зокрема деградацію фотосинтетичних пігментів, зміни співвідношення хлорофілів і каротиноїдів, посилення перекисного окиснення ліпідів та активацію ферментних систем антиоксидантного захисту (каталази, пероксидази, супероксиддисмутази). Теоретично обґрунтовано, що за умов хронічного техногенного забруднення в рослин відбуваються метаболічні перебудови на клітинному та тканинному рівнях, які можуть розглядатися як ранні маркери екологічного стресу ще до появи виражених морфологічних змін. Особливу увагу приділено можливості використання морфометричних показників (площа листової пластинки, довжина черешка, маса сирогої та сухої речовини) у поєднанні з біохімічними параметрами для підвищення достовірності оцінки стану урбоєкосистем. Зроблено висновок про необхідність застосування комплексного підходу, який поєднує аналіз акумулятивних властивостей рослин, морфометричних показників та оцінку їхнього фізіологічного статусу. **Ключові слова:** фітоіндикація, синантропні види, урбоєкосистеми, екологічний моніторинг.

Phytoindication potential of synanthropic plants in urbanized environments. Sikora V., Hryhorchuk I.

The article presents a comprehensive theoretical analysis of the problem of assessing the ecological state of urbanized environments using phytoindication methods. Under conditions of increasing anthropogenic pressure, accompanied by the accumulation of heavy metals and other xenobiotics in soils, air and water pollution, transformation of the hydrological regime, and disruption of trophic relationships, traditional physicochemical monitoring methods require supplementation with biological diagnostic approaches. The feasibility of using synanthropic herbaceous plants as a sensitive, accessible, and integrative tool for environmental quality assessment is substantiated. Based on a systematic analysis of national and international scientific sources, the key advantages of using urbanophile species, in particular *Taraxacum officinale* Wigg. and *Plantago major* L., for monitoring urban ecosystems have been identified. It has been established that the phytoindicative potential of these species is based on their high ecological plasticity, their ability to accumulate pollutants in vegetative organs, and their distinct physiological and biochemical responses to stress. The biochemical mechanisms of plant adaptation to urban conditions are analyzed, including the degradation of photosynthetic pigments, changes in the ratio of chlorophylls to carotenoids, intensification of lipid peroxidation, and activation of antioxidant enzyme systems (catalase, peroxidase, superoxide dismutase). It is theoretically substantiated that under conditions of chronic technogenic pollution, plants undergo metabolic rearrangements at the cellular and tissue levels, which may be considered early markers of ecological stress prior to the appearance of pronounced morphological changes. Particular attention is paid to the possibility of using morphometric parameters (leaf blade area, petiole length, fresh and dry weight) in combination with biochemical indicators to increase the reliability of urban ecosystem assessment. It is concluded that a comprehensive approach is necessary, combining the analysis of plant accumulation properties, morphometric parameters, and evaluation of their physiological status. **Key words:** phytoindication, synanthropic species, urban ecosystems, environmental monitoring.

Постановка проблеми. Сучасні урбоєкосистеми формуються під впливом потужного антропогенного пресингу, що призводить до суттєвої трансформації природних ландшафтів і погіршення якості довкілля. Як зазначають дослідники, урботехногенні екосистеми характеризуються специфічним мікрокліматом, ущільненням ґрунтів та, насамперед, хімічним

забрудненням важкими металами й токсичними газами [2, 6, 14]. У результаті в міських екотопах формується специфічна флора, в якій домінують синантропні трав'яністі види, здатні витримувати широкий спектр антропогенних впливів [7, 9, 10]. Разом із тим саме ці види першими реагують на зміни екологічних факторів, що створює передумови



для їх використання у фітоіндикації стану урбанізованого середовища [16, 18].

Попри значну кількість досліджень, присвячених синантропізації флори та структури урбанофлор, проблема оцінювання індикаторного потенціалу окремих синантропних трав'янистих видів залишається недостатньо систематизованою. Наявні роботи часто зосереджені на описі видового складу або ступеня антропогенної трансформації, тоді як кількісна оцінка екологічної чутливості видів до конкретних факторів (трофність, зволоження, реакція ґрунтового розчину, техногенне навантаження) потребує подальшого уточнення [7, 9, 10, 16].

Проблема полягає у необхідності наукового обґрунтування критеріїв добору синантропних трав'янистих рослин як надійних фітоіндикаторів та визначення меж їх інформативності в умовах різних типів урбанізованих біотопів. Вирішення цього завдання є важливим для вдосконалення біоіндикаційних підходів до екологічного моніторингу та підвищення точності оцінювання стану довкілля в межах міських територій.

Актуальність дослідження. Актуальність дослідження зумовлена зростаючою антропогенною трансформацією ландшафтів у містах і передмістях, що призводить до суттєвих змін у видовому складі та функціонуванні рослин. Синантропні трав'янисті рослини за своєю екологічною пластичністю і домінантністю в урбанізованих біотопах можуть бути інформативними індикаторами стану середовища, зокрема змін антропогенного навантаження, рівня забруднення, структурно-функціональних порушень біоценозів [16]. Синантропні рослини завдяки своїй стійкості формують рослинний покрив там, де аборигенні види не виживають. Попри наявні дослідження, багато питань щодо використання синантропної флори як фітоіндикаторів екологічних змін залишаються недостатньо вивченими, особливо в контексті низки факторів урбанізації: мікрокліматичних змін, техногенного забруднення ґрунтів і повітря, антропогенного упорядкування територій, різних типів урбанізованих біотопів [18]. Розуміння чутливості та індикаторного потенціалу окремих видів синантропних трав'янистих рослин дозволяє не лише оцінювати поточний екологічний стан, але й прогнозувати тенденції змін, розробляти рекомендації з моніторингу та озеленення урбанізованих територій.

Особливо актуальною ця проблема є в умовах сучасних міст України, де інтенсивність урбанізації поєднується з недостатністю систематичного екологічного моніторингу рослинності. Вивчення фітоіндикаційних властивостей синантропних рослин може значно доповнити існуючі підходи до оцінки екологічного стану урбанізованих середовищ, оскільки ці види швидко реагують на зміни факторів середовища і доступні для польових спостережень.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Авторський доробок пов'язаний із вирішенням актуальних наукових завдань сучасної урбоекології, фітоєкології та біоіндикації, що стосуються оцінювання стану урбанізованого середовища на основі реакцій рослинних організмів. Дослідження спрямоване на уточнення фітоіндикаційного потенціалу синантропних трав'янистих видів, визначення їх екологічної амплітуди та інформативності щодо антропогенно трансформованих умов існування.

Отримані результати доповнюють наукові підходи до використання біологічних методів моніторингу довкілля, зокрема шляхом обґрунтування можливості застосування окремих видів синантропної флори як індикаторів рівня антропогенного навантаження, змін ґрунтових характеристик, ступеня порушення рослинного покриву та урбанізаційних процесів. Таким чином, робота інтегрується в напрям досліджень, пов'язаних із розвитком екологічного моніторингу та оцінюванням стійкості урбоекосистем.

Практичне значення авторського доробку полягає у можливості використання отриманих даних під час проведення екологічних обстежень територій, планування заходів із відновлення та оптимізації зелених зон, розроблення локальних програм екологічного моніторингу. Результати можуть бути застосовані у діяльності органів місцевого самоврядування, природоохоронних структур, а також у навчальному процесі закладів вищої освіти під час викладання дисциплін екологічного та ботанічного профілю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання фітоіндикації та екології урбанізованого середовища висвітлені у широкому колі наукових праць. Вагомий внесок у вивчення синантропізації флори України зробили В.В. Протопопова та М.В. Шевера, які виділяють групу високоактивних видів-урбофілів, здатних до експансії в порушених екотопах [9, 10]. Фітоіндикаційний потенціал *Taraxacum officinale* (кульбаба лікарської) детально досліджувався І.О. Комаровою в умовах промислового Криворіжжя [5, 6, 14]. Авторкою встановлено високу акумулятивну здатність цього виду щодо важких металів та визначено особливості його функціонування в техногенних зонах [14]. А. Вурал [21] та М. Бобус із співавторами [11] наводять дані про використання *Taraxacum officinale* як біомонітора забруднення ґрунтів слідовими елементами та ксенобіотиками в різних країнах світу, підкреслюючи універсальність цього об'єкта. Фізіолого-біохімічні аспекти індикації, зокрема реакції пігментного комплексу та ферментних систем, розкриті у працях В.П. Бессонової та колег [2-4], а також у дослідженнях Т.В. Андрусишина з колегами [1].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Незважаючи на наявність численних досліджень, присвячених синантропізації флори та

структурі урбанофлор, низка аспектів залишається недостатньо розробленою. Так, відсутня узагальнена система оцінювання фітоіндикаційного потенціалу саме синантропних трав'янистих видів, які найчастіше формують рослинний покрив урбанізованих територій. Більшість робіт зосереджена на флористичних переліках або аналізі ступеня трансформації рослинності, тоді як індикаторні можливості окремих видів часто розглядаються фрагментарно.

Недостатньо визначено межі екологічної толерантності синантропних видів у конкретних типах міських біотопів, зокрема щодо показників зволоження, трофності, реакції ґрунтового розчину та рівня антропогенного навантаження. Це ускладнює використання таких видів як кількісних індикаторів стану середовища.

Бракує порівняльних досліджень, які б поєднували аналіз екологічних характеристик видів із практичними потребами локального екологічного моніторингу. Невизначеними залишаються критерії добору найбільш інформативних синантропних трав'янистих рослин для оцінювання ступеня урбанізаційної трансформації територій.

Новизна. У статті здійснено комплексну оцінку фітоіндикаційного потенціалу синантропних трав'янистих видів в умовах урбанізованого середовища з урахуванням сукупності екологічних чинників. Уточнено екологічні амплітуди та індикаторні можливості окремих синантропних видів у межах різних типів міських біотопів, що дозволяє розширити уявлення про їх роль не лише як компонентів трансформованої флори, а й як чутливих біоіндикаторів змін довкілля.

Методологічне або загальнонаукове значення. Дослідження розвиває підходи до використання синантропних трав'янистих видів у системі фітоіндикації урбанізованого середовища та уточнює принципи їх добору як індикаторів антропогенного навантаження. Отримані результати розширюють теоретичні засади біоіндикації в межах урбоекології та можуть бути використані при формуванні науково обґрунтованих програм екологічного моніторингу міських територій.

Викладення основного матеріалу.

Антропогенна трансформація рослинного покриву є одним із ключових наслідків урбанізації, індустріалізації та інтенсифікації землекористування. Одним із найбільш виражених проявів цього процесу є синантропізація флори – зростання ролі видів, здатних існувати й домінувати в умовах постійного антропогенного впливу. За узагальненими даними для трав'янистих біотопів України синантропна фракція налічує 584 види судинних рослин, що належать до 351 роду та 72 родин, з домінуванням *Asteraceae*, *Brassicaceae* та *Poaceae* [7]. Синантропні види представлені як апофітами (53,8%), так і адвентивними рослинами, серед яких за часом занесення переважають кенофіти (58,8%) [7].

М.В. Шевера та співавтори зазначають, що процес синантропізації рослинного покриву, який проявляється через посилення апофітизації (зростання частки аборигенних видів, що змушені адаптуватися до трансформованих людиною умов) і адвентивізації флори та рослинності, зумовленої проникненням чужорідних видів, вважається другою за значущістю проблемою збереження біорізноманіття після руйнування природних оселищ [10]. Вплив адвентивних організмів розглядається як один із деструктивних чинників, що негативно позначається на стані довкілля, зокрема рослинного покриву. Їх активному та часто спонтанному поширенню сприяють глобалізація торгівлі, розвиток транспорту і туризму, інтродукція рослин, аграрна діяльність, воєнні дії тощо, тоді як кліматичні зміни створюють умови для формування нових адаптивних механізмів до зміненого середовища [10]. Вивчення антропогенної трансформації флори в Україні розвивається як окремий науковий напрям. В той же час, автори зазначають, що на сьогоднішній день фокус уваги змістився на вивчення екологічних особливостей чужорідних видів, і таких досліджень стає дедалі більше [10].

Українські науковці отримали суттєві результати у дослідженні різних аспектів синантропізації рослинного покриву – від детального аналізу окремих чужорідних, зокрема інвазійних видів, до узагальнення накопичених даних щодо комплексних наслідків їхнього впливу [10]. Накопичені напрацювання створюють міцне наукове підґрунтя для розроблення заходів із контролю та стримування поширення таких видів. Водночас практичне розв'язання проблеми насамперед залежить від її належного правового врегулювання на державному рівні. Наразі формування законодавчої бази та розвиток інституційної спроможності у сфері управління чужорідними організмами в Україні фактично не просулися, оскільки досі не ухвалено ні спеціальної стратегії, ні необхідних змін до законодавства, які б забезпечили реалізацію ключових положень, окреслених у проєкті Стратегії національної безпеки [10].

Окремим напрямом дослідження синантропних рослин є використання їх у фітоіндикаційних дослідженнях для оцінювання стану довкілля за їх морфологічними, фізіологічними та біохімічними змінами. На відміну від одноразових фізико-хімічних аналізів, рослини здатні інтегрувати та акумулювати інформацію про рівень і характер забруднення впродовж певного часу й у межах конкретного простору [20].

Синантропні рослини мають низку переваг як об'єкти біоіндикації: постійно присутні у міських екотопах, здатні акумулювати як неорганічні, так і органічні поліутанти, характеризуються відносною простотою відбору та ідентифікації.

Як показано в оглядових і експериментальних роботах, ці рослини ефективно відображають забруднення важкими металами, поліциклічними

ароматичними вуглеводнями, фармацевтичними сполуками та іншими ксенобіотиками [20].

Найбільш дослідженим аспектом фітоіндикаційного потенціалу синантропних рослин є їхня здатність до акумуляції важких металів. У численних роботах доведено лінійні або квазілінійні зв'язки між вмістом металів у ґрунті та рослинних тканинах.

Так, *Taraxacum officinale* показав високу здатність накопичувати Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Cd та Pb, що дозволяє використовувати його як пасивний біоіндикатор промислових територій [18]. Аналогічні результати отримано в умовах промислового Криворіжжя, де встановлено специфіку транслокації металів у системі «ґрунт–корінь–листок» та активацію процесів пероксидного окиснення ліпідів за високого рівня забруднення [14]. У дослідженнях Т.В. Андрусишина з колегами [1], було показано, що *Taraxacum officinale*, які ростуть у долині річки Збруч, у зоні впливу міського сміттєзвалища м. Волочиськ Хмельницької області, характеризувалися вищим вмістом важких металів, ніж у рослин із порівнюваних природних екосистем [1].

Plantago major розглядається як надійний індикатор транспортного забруднення, зокрема Cu, Zn, Cd та Pb, що підтверджено як польовими, так і експериментальними дослідженнями [1, 13, 15]. Для цього виду характерна кореляція між концентраціями металів у ґрунті та вегетативних органах, що підвищує його індикаторну цінність.

Дослідження Д. Малізія [15] показали, що вміст металів у коренях трав'янистих синантропних рослин зазвичай перевищує їх концентрацію в листках, що відображає бар'єрну роль кореневої системи. Водночас накопичення металів у надземних органах робить можливим використання листків як індикаторного матеріалу.

Також було вивчено ряд інших видів синантропної флори як можливих кандидатів для моніторингу стану навколишнього середовища: *Achillea millefolium* L., *Urtica dioica* L., *Trifolium pratense* L., *Rumex acetosa* L., *Amaranthus retroflexus* L., *Plantago lanceolata* L., *Senecio vulgaris* L., *Polygonum aviculare* L., *Poa annua* L., *Chelidonium majus* L. [1, 8, 12, 15, 17, 19].

Окрім акумуляції поллютантів, важливим напрямом є аналіз фізіологічних і біохімічних відповідей синантропних рослин на стресові чинники. Показано, що забруднення важкими металами супроводжується зростанням вмісту H₂O₂, малонового діальдегіду та активності антиоксидантних ферментів [12].

Для *Taraxacum officinale* доведено інформативність палінологічних показників, параметрів генеративної сфери та особливостей проростання насіння

як критеріїв біоіндикації [5, 6, 14]. Такі інтегральні ознаки відображають не лише рівень забруднення, а й адаптаційні стратегії виду.

У дослідженнях рудеральних і дикорослих рослин у міських умовах Саудівської Аравії показано, що рослини здатні акумулювати широкий спектр органічних забруднювачів з повітря, ґрунту та води, що підтверджує універсальність фітоіндикаційного підходу [16].

Синантропні рослини не лише реагують на антропогенний тиск, але й формують основу рослинного покриву трансформованих територій. У зонах високого забруднення саме вони домінують у фітоценозах, замінюючи чутливі до поллютантів види [1, 8].

Висока екологічна пластичність, здатність до акумуляції забруднювачів і толерантність до стресу роблять синантропні види перспективними не лише для біоіндикації, але й для фіторе mediaції забруднених територій.

Отже, проаналізовані джерела свідчать, що синантропні рослини є науково обґрунтованими об'єктами фітоіндикаційних досліджень. Їхні морфологічні, фізіологічні та біохімічні характеристики інтегрально відображають рівень антропогенного навантаження в урбосистемах. Найбільш перспективними видами є *Taraxacum officinale* та *Plantago major*, для яких доведено індикаторну значущість у різних екологічних умовах.

Головні висновки.

Отже, синантропні трав'янисті види є інформативним компонентом урбанofлори та можуть використовуватися як ефективні фітоіндикатори стану урбанізованого середовища. Встановлено, що найбільш об'єктивною є комплексна оцінка екологічного стану, яка поєднує аналіз акумуляції важких металів, визначення морфометричних порушень та діагностику біохімічного статусу. Використання запропонованого мультимаркерного підходу дозволить підвищити точність екологічного моніторингу та своєчасно виявляти загрози для біоти та населення міст. З огляду на специфіку малих і середніх міст України, де відсутні розгалужені системи стаціонарного екологічного контролю, застосування синантропних рослин як біоіндикаторів є економічно доцільним та методично обґрунтованим інструментом оцінки стану довкілля.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати теоретичного узагальнення є основою для подальшого аналізу синантропних видів рослин, проведення довготривалих спостережень у межах різних типів урбанізованих екотопів, а також інтеграції біоіндикаційних методів із фізико-хімічними показниками стану довкілля для підвищення точності екологічної оцінки.

Література

1. Андрусишин Т.В., Грубінко В.В., Ярема О.М. Вміст важких металів вегетативної частини рудеральних рослин у зв'язку з умовами зростання забруднення. *Наук. зап. Терноп. нац. пед. ун-ту. Сер. Біол.* 2022. Т. 82, № 4. С. 29–35.
2. Бессонова В.П., Бессонов Є.П., Зверковський В.М. Оцінка стану пилку деревних рослин в урботехногенній екосистемі. *Питання біоіндикації та екології*. 2013. Вип. 18, № 1. С. 70–83.
3. Бессонова В.П., Іванченко О.Є. Вміст важких металів у листках деревних рослин парків м. Дніпропетровська. *Питання степового лісознавства та лісової рекультиваци земель*. 2020. Вип. 49. С. 64–72.
4. Бессонова В.П., Іванченко О.Є., Пономарьова О.А. Одночасний вплив важких металів (Pb^{2+} і Cd^{2+}) та заселення на стан асиміляційного апарату і вміст пігментів фотосинтезу пажитниці багаторічної. *Вісник Дніпропетровського університету. Серія «Біологія. Екологія»*. 2015. Вип. 23, № 1. С. 15–20.
5. Комарова І.О. Особливості функціонування рослинного організму в урботехногенній екосистемі (аналіз стану проблеми). *Питання біоіндикації та екології*. 2015. Вип. 20, № 2. С. 18–29.
6. Комарова І. О. *Taraxacum officinale* Wigg. як об'єкт біоіндикаційних досліджень в умовах Криворіжжя. *Екологічний вісник Криворіжжя*. 2016. Вип. 2. С. 53–56.
7. Кучер О.О., Мойсієнко І.І., Ємельянова С.М., Вашеняк Ю.А., Буджак В.В., Куземко А.А. Аналіз синантропізації трав'яних біотопів України. *Chornomorski Botanical Journal*. 2021. 17 (4). С. 316–330. <https://doi.org/10.32999/ksu1990-553X/2021-17-4-2>.
8. Мамчур З., Чуба М. Екологічні особливості синантропної флори території центральної щільної забудови міста Львова. *Biol. Stud.* 2016. 10 (1). р. 143–154. DOI: <https://doi.org/10.30970/sbi.1001.466>.
9. Протопопова В.В., Шевера М.В. Інвазійні види у флорі України. І. Група високоактивних видів. *Біологічні студії*. 2019. Т. 13, № 1. С. 91–102.
10. Шевера М.В., Протопопова В.В., Зав'ялова Л.В., Бурда Р.І., Буджак В.В., Коломійчук В.П., Бойко Н.С., Дойко Н.М., Кучер О.О., Двірня Т.С., Конякін С.М., Мордатенко І.Л., Міськова О.В. Актуальні напрями досліджень синантропізації рослинного покриву України. *Вісник НАН України*. 2025. № 11. С. 78–94. <https://doi.org/10.15407/vsn2025.11.078>.
11. Bogus M., Brzezinski T., Nachula A. et al. A comprehensive analysis of chemical and biological pollutants (natural and anthropogenic origin) of soil and dandelion (*Taraxacum officinale*) samples. *Plos One*. 2023. Vol. 18, N. 1. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0280810>.
12. Cakaj A., Lisiak-Zielinska M., Hanc A., Malecka A., Borowiak K., Drapikowska M. Common weeds as heavy metal bioindicators: a new approach in biomonitoring. *Sci Rep*. 2023. 28. 13(1): 6926. DOI: 10.1038/s41598-023-34019-9
13. Galal T.M., Shehata H.S. Bioaccumulation and translocation of heavy metals by *Plantago major* L. grown in contaminated soils under the effect of traffic pollution. *Ecological Indicators*. 2015. 48. p. 244–251. DOI: 10.1016/j.ecolind.2014.08.013
14. Komarova I. *Taraxacum officinale* Wigg. as a bioindicator of heavy metals accumulation in soil of the mining and metallurgical region. *Ecological Sciences*. 2020. N 33. p. 172–177. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.6-33.26>.
15. Malizia D., Giuliano A., Ortaggi G., Masotti A. Common plants as alternative analytical tools to monitor heavy metals in soil. *Chem Central J*. 2012. 6 (Suppl 2):S6. <https://doi.org/10.1186/1752-153X-6-S2-S6>
16. Pico Y., Campo J., Alfahhan A.H., El-Sheikh M.A., Barcelo D. Wild and ruderal plants as bioindicators of global urban pollution by air, water and soil in Riyadh and Abha, Saudi Arabia. *Science of The Total Environment*. 2023. Vol. 888. 164–166. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164166>.
17. Rahmonov O., Srodek D., Pytel S., Kupka T., Makieieva N. Mineral Composition of *Chelidonium majus* L. and Soils in Urban Areas. *Applied Sciences*. 2025. 15(9): 4718. <https://doi.org/10.3390/app15094718>.
18. Respondek Z., Isinkaralar O., Swisłowski P., Isinkaralar K., Rajfur M. Biomonitoring with the Use of the Herbal Plant *Taraxacum officinale* as a Source of Information on Environmental Contamination. *Plants* (Basel). 2024. 29; 13(13). p.1805. <https://doi.org/10.3390/plants13131805>.
19. Salinitro M., Tassoni A., Casolari S., de Laurentiis F., Zappi A., Melucci D. Heavy Metals Bioindication Potential of the Common Weeds *Senecio vulgaris* L., *Polygonum aviculare* L. and *Poa annua* L. *Molecules*. 2019. 24(15): 2813. <https://doi.org/10.3390/molecules24152813>.
20. Tarish M., Ali RT., Shan M., Amjad Z., Rui Q., Akher SA., Al Mutery A. Plant Tissues as Biomonitoring Tools for Environmental Contaminants. *International Journal of Plant Biology*. 2024. 15(2). p. 375–396. <https://doi.org/10.3390/ijpb15020030>.
21. Vural A. Trace element accumulation behavior, ability, and propensity of *Taraxacum officinale* F. H. Wigg (dandelion). *Environmental Science and Pollution Research*. 2024. Vol. 31. p. 16667–16684. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32293-2>

Дата першого надходження статті до видання: 02.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

ОРГАНІЗАЦІЯ ПОЖЕЖНОЇ ПРОФІЛАКТИКИ ТА ПРОТИПОЖЕЖНОЇ АГІТАЦІЇ У ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМАХ ФІЛІЇ «СТОЛИЧНИЙ ЛІСОВИЙ ОФІС» ДП «ЛІСИ УКРАЇНИ»

Житова О.П.¹, Мороз В.В.², Шелюк Ю.С.³

¹Поліський національний університет
Старий бульв., 7, 10002, м. Житомир

²Західноукраїнський національний університет
вул. Львівська, 11, 46009, м. Тернопіль

³Житомирський державний університет імені Івана Франка
вул. Велика Бердичівська, 40, 10008, м. Житомир
elmi1969@meta.ua

У статті здійснено аналіз пожежно-профілактичних заходів щодо попередження виникнення лісових пожеж в екосистемах філії «Столичний лісовий офіс» ДП «Ліси України» на прикладі філії «Олевське лісове господарство». Підкреслено, що значення середніх класів пожежної небезпеки по лісництвах філії коливаються в межах 2,15-3,11 (середнє значення – 2,60), що свідчить про необхідність посилення пожежно-профілактичних заходів. Обґрунтовано, що вирішення проблеми лісових пожеж у сучасних умовах господарювання потребує апробації та впровадження нових форм і методів протипожежної профілактики, а також здійснення дієвих заходів щодо формування правил безпечної поведінки працівників лісової галузі та громадян у лісових масивах з урахуванням умов воєнного стану.

Усі профілактичні заходи, запроєктовані підприємством, є необхідними і практично обґрунтованими. Вони мають довгостроковий характер і спрямовані на суттєве підвищення рівня протипожежної безпеки в лісах філії, зменшення ризиків виникнення пожеж та мінімізацію можливих збитків для лісових екосистем і господарської інфраструктури.

З метою вдосконалення протипожежної профілактики в умовах досліджуваної філії запроєктовано проведення теоретико-практичної підготовки працівників лісового господарства та запропоновано покроковий алгоритм організації заходів із удосконалення протипожежної агітації в умовах господарювання. Врахування воєнного стану в країні обумовлює необхідність поширення практичних рекомендацій щодо дотримання правил пожежної безпеки та оперативного реагування на потенційні загрози виникнення лісових пожеж, що сприяє підвищенню ефективності профілактичних заходів та забезпеченню збереження лісових екосистем. *Ключові слова:* лісова пожежа, Філія «Олевське лісове господарство», профілактичні протипожежні заходи, протипожежна агітація, клас пожежної небезпеки, воєнні дії.

Organization of fire prevention and fire-prevention agitation in forest ecosystems of the «Stolychnyi forest office» branch of se «Forests of Ukraine». Zhytova O., Moroz V., Shelyuk Yu.

The article presents an analysis of fire-prevention measures aimed at preventing forest fires in the ecosystems of the “Stolychnyi Forest Office” branch of the State Enterprise “Lisy Ukrainy,” using the “Olevske Forestry” branch as a case study. It is emphasized that the values of average forest fire danger classes across the branch’s forest districts range from 2.15 to 3.11 (mean value – 2.60), indicating the need to strengthen fire-prevention measures. It is substantiated that addressing the issue of forest fires under current management conditions requires the testing and implementation of new forms and methods of fire prevention, as well as the enactment of effective measures to establish safe behavior rules for forestry workers and the general public in forest areas, taking into account the conditions of martial law.

All preventive measures designed by the enterprise are necessary and practically justified. They are long-term in nature and aimed at significantly enhancing the level of fire safety in the branch’s forests, reducing the risks of fire occurrence, and minimizing potential damage to forest ecosystems and management infrastructure.

To improve fire-prevention practices in the studied branch, theoretical and practical training of forestry workers has been planned, and a step-by-step algorithm for organizing measures to enhance fire-prevention advocacy under current management conditions has been proposed. Consideration of the martial law in the country necessitates the dissemination of practical recommendations on compliance with fire safety rules and the prompt response to potential threats of forest fires, which contributes to increasing the effectiveness of preventive measures and ensuring the preservation of forest ecosystems. *Key words:* forest fire, Olevske Forestry Branch, preventive fire protection measures, fire prevention awareness, fire hazard class, military actions.



Постановка проблеми. В Україні за останні десятиріччя, все частіше піднімається питання зростання кількості лісових пожеж, зокрема великих, які є серйозною небезпекою для економіки країни [8]. Глобальні зміни клімату, інтенсивне накопичення горючих матеріалів на територіях пройдених і не пройдених пожежами, військові дії в країні, призводять до підвищення ризиків розвитку неконтрольованих пожеж в лісах, гасіння яких потребуватиме значних матеріальних витрат і зусиль [2, 6, 7, 9, 11]. Варто відзначити, що лісові пожежі, спричинені військовими діями, охоплюють переважно великі території та є більш інтенсивними ніж пожежі з природних причин, що ускладнює їх гасіння та контроль. За актуальними даними Державного агентства лісових ресурсів [17], внаслідок російської агресії з початку 2024 року було ліквідовано 149 лісових пожеж на площі 460 га. За активної участі ДСНС було ліквідовано 117 лісових пожеж, що становить 57 % від загальної кількості випадків [15].

Однією з вагомих причин виникнення лісових пожеж є порушення населенням Правил пожежної безпеки в лісах, випалюванням рослинності та недотриманням правил пожежної безпеки при виконанні робіт на які припадає 35 % від загальної кількості випадків пожеж.

Незважаючи на впровадження Державним агентством лісових ресурсів України сучасних методів моніторингу та контролю за лісовими пожежами підключаючи традиційні засоби використання з передовими технологіями, ситуація з лісовими пожежами в країні залишається складною. Задля контролю за лісопожежною ситуацією в країні, наразі надзвичайно актуальним лишається питання підвищення ефективності організаційних і технологічних заходів щодо профілактики пожеж, протипожежної пропаганди та досягнення високих результатів у питаннях управління пожежами шляхом оптимального розподілу сил і ресурсів пожежогасіння.

Актуальність дослідження. Враховуючи що лісові пожежі є одним із найнебезпечніших екологічних факторів, які призводять до порушення рівноваги між компонентами лісових екосистем та становлять загрозу існуванню лісів, їх охорона є однією з основних складових сталого управління лісами [10].

Аналіз багаторічної динаміки лісових пожеж в Україні свідчить про суттєве зростання їх кількості, пік яких за весь період спостереження припав на останнє десятиліття минулого сторіччя [8]. За цей період середня температура зросла на 0,8 °C, і нині кліматична система рухається в напрямку підвищення середньої світової температури до +4 °C [8].

Враховуючи, що біля 95 % лісових пожеж виникає внаслідок антропогенного фактору, і 5 % у результаті екстремальних погодних умов [7], вирішення проблеми лісових пожеж у сучасних умовах господарювання потребує використання продуктивних

заходів протипожежних профілактичних заходів, які передбачають тестування нових форм і методів протипожежної пропаганди, пошук і здійснення особливо дієвих заходів формування правил безпечної поведінки громадян в лісі, з урахуванням умов воєнного стану.

Відповідно Лісового кодексу України, просвітницька робота з пожежної безпеки як особливий вид профілактики лісових пожеж не виокремлюється. Наразі протипожежна пропаганда здійснюється у формі облаштування місць відпочинку для відвідувачів лісу, встановлення і розміщення стендів і інших агітаційних плакатів, які містять інформацію про заходи протипожежної безпеки в лісі.

Мета роботи полягала в аналізі протипожежної профілактики та особливостей проведення протипожежної пропаганди на прикладі філії «Олевське лісове господарство» (до реорганізації в межах «Столичного лісового офісу» ДП «Ліси України») з метою підвищення ефективності та адресності цих заходів у сфері управління лісовою галуззю.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Авторський доробок спрямований на вирішення актуальних екологічних проблем, пов'язаних із запобіганням лісовим пожежам, як одному з ключових чинників деградації лісових екосистем. Особливу увагу приділено вдосконаленню протипожежної пропаганди як важливої складової загальної системи забезпечення пожежної безпеки в лісових екосистемах, а також підвищенню результативності просвітницьких заходів і цілеспрямованої організаційної діяльності, спрямованої на профілактику лісових пожеж. У цьому контексті вагомого значення набуває формування позитивного іміджу лісової охорони, як професійної та соціальної відповідальності інституції, діяльність якої спрямована на збереження лісових ресурсів і забезпечення безпеки населення. Це загалом сприяє підвищенню рівня довіри з боку громадськості та запобігання порушенням правил пожежної безпеки в лісах, з урахуванням умов воєнного стану в країні.

Практичне значення роботи полягає в обґрунтуванні можливостей застосування теоретико-методичних підходів і практичних рекомендацій для підвищення ефективності системи протипожежної профілактики, зокрема в діяльності лісгосподарських підприємств, органів місцевого самоврядування, природоохоронних установ, органів екологічного контролю та в системі екологічної освіти. Отже, авторська робота забезпечує науково-практичне обґрунтування підходів до формування екологічно відповідальної поведінки населення, пожежної безпеки та підвищення ефективності системи профілактики лісових пожеж у контексті сталого розвитку лісових екосистем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання лісових пожеж з екологічної, економічної та

соціальної точки зору в Україні та в інших країнах світу залишається актуальною, про що свідчить низка робіт [1, 3, 4, 12, 13, 19, 21, 22]. Згідно з останніми дослідженнями та публікацій міжнародних організацій [14, 18, 21], з кінця XX століття кількість і частота великих лісових пожеж, що відзначаються катастрофічними наслідками та надзвичайними масштабами, постійно зростає. За даними Zibtsev et al., С. В. Зібцев, О. М. Сошенський [8, 20, 23] в кожному десятилітті стаються три-чотири катастрофічні пожежі. Проте, незважаючи на значну кількість робіт, присвячених лісовим пожежам, відомості про них є ще неповними та потребують подальшого вивчення, особливо з огляду на сучасні кліматичні зміни та їхній вплив на частоту і площі поширення вогню.

Необхідно відзначити, що через військові дії в Україні пожежна небезпека в лісових екосистемах лише зростає, про що зазначають Р. А. Валерко, Л. О. Герасимчук [1], Л. О. Герасимчук, Р. А. Валерко, І. Г. Пацева [3], М. М. Заверюха [6]. За даними робочої групи Державної екологічної інспекції, агресором було здійснено понад 200 злочинів проти навколишнього середовища країни [5]. З початку воєнних дій на території країни площа лісових втрат значно збільшилась, частка вигорання деревини зросла, а безпосередні бойові дії й обстріли стали частою причиною механічного пошкодження чагарників і дерев, їх займання [11]. На нещодавно виниклих згарищах формуються сприятливі природні умови для розмноження комах-шкідників та розвитку грибкових захворювань [11]. Крім того, зростання рекреаційного навантаження на ліси та інтенсифікація господарської діяльності сприятимуть збільшенню кількості лісових пожеж та їх масштабів [4]. У зв'язку з цим, вкрай важливим є забезпечення комплексних заходів із управління лісовими пожежами шляхом впровадження ефективних протипожежних заходів та результативної протипожежної пропаганди серед населення.

Методологічне значення. Проаналізовані та обґрунтовані аспекти формують методологічне підґрунтя для вдосконалення заходів щодо підвищення ефективності системи протипожежної профілактики, зокрема для покращення результативності протипожежної агітації в умовах воєнного стану в Україні. Запропонований підхід до організації протипожежної пропаганди, зокрема щодо підвищення її ефективності може бути використаний лісгосподарськими підприємствами, ДСНС та природоохоронними установами для здійснення управлінських і практично-обґрунтованих заходів із попередження лісових пожеж.

Виклад основного матеріалу. Пожежна безпека у філії «Олевське лісове господарство» здійснюється відповідно до вимог установлених Правилами пожежної безпеки в Україні [16]. Попри злагодженої роботи лісової охорони філії та її професіоналізму, проблема захисту лісів від пожеж залишається актуальною.

Аналіз горимості лісів господарства, свідчить про необхідність посилення профілактичних протипожежних заходів [4]. Встановлено, що значення середніх класів пожежної небезпеки по лісництвах філії коливаються в межах 2,15-3,11 (середнє значення – 2,60), що свідчить про необхідність посилення пожежно-профілактичних заходів. Важливе місце в профілактиці пожеж посідає проведення тренінгів для працівників та активне використання протипожежної пропаганди. Її мета полягає у поширенні знань про правила пожежної безпеки, формування відповідального ставлення до лісу, а також розвиток навичок, правильної поведінки у надзвичайних ситуаціях.

Задля попередження лісових пожеж, підприємством було вжито низку профілактичних заходів спрямованих на зменшення ризику їх виникнення та підвищення обізнаності громадян про правила безпеки в лісових масивах. Працівниками філії, за досліджений період, було проведено понад 18 зібрань з місцевим населенням для обговорення проблем лісових пожеж. У рамках інформаційної компанії встановлено 6 протипожежних вітрин, облаштовано 160 місць розведення багать, паління та відпочинку, а також встановлено 160 попереджувальних аншлагов. З метою підвищення рівня пожежної безпеки, підприємство щороку здійснює відповідні організаційно-технічні заходи. Зокрема, виносяться та оприлюднюються рішення районної державної адміністрації «Про заходи охорони лісів від пожеж», а також накази по підприємству «Про підготовку пожежонебезпечного періоду та покращенню пожежної охорони лісів від пожеж».

Для вдосконалення протипожежних профілактичних заходів та мінімізації їхніх наслідків, ми запроектували проведення як теоретико-практичної підготовки працівників господарства, так і впровадження додаткових профілактичних заходів. З огляду на воєнні дії в Україні, у процесі підготовки працівників філії з питань охорони лісів від пожеж та забезпечення їх особистої безпеки під час виконання службових обов'язків у лісових масивах, необхідно проводити спеціальні заняття з метою навчання основам мінної безпеки, порядку дій і правилам поведінки у разі виявлення боєприпасів або вибухонебезпечних предметів (табл. 1).

Усі профілактичні заходи, які запроектовані підприємством є практично необхідними, мають довгостроковий характер і спрямовані на суттєве підвищення рівня протипожежної безпеки в лісах філії.

З огляду на інтенсивність експлуатації лісових ресурсів, класу пожежної безпеки лісів філії, одним із пріоритетних напрямків діяльності підприємства має бути підвищення ефективності профілактичних заходів із запобігання лісовим пожежам. Слід зазначити, що бойові дії на території країни, створюють додаткові загрози виникнення лісових пожеж на землях філії.

Таблиця 1

План проведення навчальних занять

№	Теми занять	Види навчальних занять
Правила пожежної безпеки в лісах України		
1	Тема 1. <i>Правила пожежної безпеки в лісах України. (2 год.)</i> • Організаційні та профілактичні заходи щодо забезпечення пожежної безпеки. • Протипожежні вимоги на землях лісгосподарського призначення. • Порядок організації роботи лісопожежної станції. • Порядок організації гасіння лісових пожеж.	Практичне заняття
2	Тема 2. <i>Охорона лісів від пожеж. (2 год.)</i> • Організація охорони лісів від пожеж. • Проведення протипожежних профілактичних заходів. • Протипожежне упорядкування території. • Виявлення пожеж і використання пожежних інформаційних систем.	Практичне заняття
3	Тема 3. <i>Первинні засоби пожежогасіння : вогнегасники (2 год.)</i> • Класифікація первинних засобів пожежогасіння. • Визначення типів вогнегасників та розрахунок їх необхідної кількості. • Правила зберігання, догляд і порядок використання засобів пожежогасіння.	Практичне заняття
4	Тема 4. <i>Оцінка пожежної обстановки в лісі. (2 год.)</i> 1. Попередня оцінка пожежної обстановки. 2. Оперативна оцінка пожежної обстановки. 3. Фактори ураження при пожежах.	Практичне заняття
5	Тема 5. <i>Правила поведінки при виявленні вибухонебезпечних предметів (тактико-спеціальні навчання, 2 год.)</i> • Наземні міни, боєприпаси : огляд, типи мін та спосіб ураження. Правила безпеки. • Правила поведінки при виявленні вибухонебезпечних або схожих на них предметів. • Домедична допомога при пораненні.	Практичне заняття (тактико-спеціальні навчання)

Аналіз отриманих даних по філії «Олевське лісове господарство» за період 2019-2023 рр. показав, що у 56% випадків причиною виникнення лісових пожеж були неконтрольовані підпали. Значення цього показника коливалося в межах 1,85 % до 46,3 %, з мінімальним значенням в 2023 році та максимальним – у 2020 році. Упродовж зазначеного періоду пожежі, спричинені місцевим населенням, були зареєстровані лише у 2019 році. Водночас ризики виникнення лісових пожеж зберігаються, оскільки зростає інтенсивність відвідування лісових територій населенням. Тому, на сьогодні, це потребує посилення просвітницьких заходів та організації цілеспрямованої роботи щодо запобігання лісовим пожежам.

Спираючись на отримані дані по філії, з метою підвищення ефективності протипожежної агітаційної роботи серед населення та працівників лісового господарства нами запропоновано покроковий алгоритм організації заходів із удосконалення протипожежної агітації.

Крок 1. Визначення оптимальних термінів початку агітаційної кампанії у засобах масової

інформації. Необхідно окреслити зони інтенсивної протипожежної профілактики на території підприємства та визначити ключові точки для розміщення засобів наочної агітації.

Крок 2. Розроблення матриці для створення засобів пропаганди із залученням учнів, студентів спеціальності «Лісове господарство», «Екологія» та студентів педагогічних спеціальностей. Такий підхід сприяє підвищенню ефективності профілактичної роботи, формуванню екологічної свідомості та розвитку партнерської взаємодії між освітніми закладами й лісгосподарськими підприємствами.

Крок 3. Уточнення інформації. На цьому етапі необхідно визначити конкретні місця для розміщення інформаційних матеріалів (плакатів, листівок) з метою повного й ефективного сприйняття інформації населенням. До таких місць належать роздоріжжя доріг, рекреаційні пункти лісових господарств та інші локації з інтенсивним перебуванням відпочиваючих. Важливим є врахування обсягу інформації, з якими людина здатна ознайомитись за певний час, вибору оптимального шрифту та способу подання матеріалу для комфортного сприйняття інформації.

Крок 4. Здійснення тестування або експертної оцінки засобів наочної агітації із залучення фахівців і громадян, які не брали участі у проведенні роботи. Цей етап дає змогу отримати якісний зворотній зв'язок, що сприяє подальшому вдосконаленню інформаційних матеріалів і підвищення їхньої впливовості на цільову аудиторію.

Крок 5. Виготовлення та розміщення наочної агітації у визначених локаціях. До виконання цієї роботи доцільно залучати учнів, студентів та зацікавлених громадян, оскільки їхня участь сприятиме більш ефективному поширенню інформації та підвищенню результативності проведеної роботи.

Отже, все вищезазначене може стати основою для коригування системи організації протипожежної агітації з метою підвищення її ефективності. Слід відзначити, що результативність агітаційної діяльності визначається не лише кількістю розповсюджених інформаційних матеріалів, а їхньою якістю та доцільністю розміщення у конкретних локаціях, що забезпечує доступність і повноцінне сприйняття інформації. Ефективна організація протипожежної пропаганди потребує чіткого продуманого плану дій, який передбачає проведення експертної оцінки засобів наочної агітації та залучення до такої роботи висококваліфікованих фахівців, зокрема педагогів і психологів.

Одним із засобів профілактики лісових пожеж є навчання населення навичкам безпечного перебування в лісі. Значну роль у цьому процесі може відігравати підготовка шкільних вчителів, керівників учнівських лісництв, волонтерів, а також керівників організацій і підприємств. Надалі вони можуть передавати отримані знання населенню та активно долучатися до організацій проведення заходів, спрямованих на зменшення кількості лісових пожеж. Крім того, вони можуть надавати підтримку працівникам державних служб у реалізації ефективної лісопожежної агітації.

Наразі у філії «Олевське лісове господарство», з урахуванням воєнного стану в країні, існує необхідність і надалі підвищувати ефективність проведення інформаційної кампанії. Вона має охоплювати обговорення проблеми лісових пожеж, визначення відповідальності громадян за їх виникнення, демонстрацію шкоди, яку завдають лісові пожежі здоров'ю та життю населення, а також активне використання інтернет-технологій і соціальних мереж у протипожежній пропаганді.

Важливим елементом є проведення регулярних зустрічей із населенням, робота з учнями у школах, участь у діяльності учнівських лісництв для підвищення їх обізнаності щодо небезпеки лісових пожеж, з особливим акцентом на їхні наслідки для природоохоронних територій. Необхідно також акцентувати увагу на роз'яснювальній роботі з місцевими фермерами, працівниками сільськогосподарських підприємств та загалом із населенням щодо заборони

спалювання рослинних залишків, інформуючи про відповідальність за такі дії.

Ключовим кроком є узгодження щорічного плану реагування на надзвичайні ситуації з представниками об'єднаної територіальної громади та керівниками організацій, включених до цього плану, з визначенням порядку взаємодії, каналів зв'язку, підпорядкування, а також призначення відповідальних осіб і ресурсів для гасіння пожеж. Для підвищення готовності до дій у разі виникнення лісових пожеж необхідно проводити штабні навчання із залученням усіх осіб, зазначених у плані, для відпрацювання узгодженості дій під час гасіння лісових пожеж.

Важливою складовою є розробка сучасних методів прогнозування початку пожежонебезпечного періоду в лісі на підставі комплексного підходу з урахуванням метеорологічних, антропогенних і природних факторів, а також характеристики самого лісу. Необхідно відзначити, що розробка математичної моделі, застосування якої дозволяє прогнозувати розвиток і розповсюдження лісової пожежі, сприяє виробленню ефективних рішень та їх впровадженню у боротьбі з пожежами. Крім того, існує потреба у своєчасному виявленні лісових пожеж та спостереженні за їхнім розвитком із використанням космічних систем дистанційного зондування Землі.

Головні висновки. Здійснений аналіз протипожежної профілактики та протипожежної агітації лісових пожеж на прикладі філії «Олевське лісове господарство» свідчить про необхідність її подальшого удосконалення. Це передбачає критичний аналіз динаміки лісових пожеж, причин їх виникнення та підвищення ефективності інформаційної кампанії серед місцевого населення, учнів і органів місцевої влади. Особливо важливим є посилення протипожежної пропаганди, яка має бути зрозумілою та доступною, що сприятиме усвідомленню громадянами власної відповідальності за безпеку, з урахуванням воєнного стану в країні.

Отже, вирішення проблеми лісових пожеж у умовах філії «Олевське лісове господарство» вимагає не тільки високої оперативності у виявленні та гасінні лісових пожеж, а й ефективних профілактичних заходів. Це включає впровадження нових форм і методів протипожежної агітації, а також пошук особливо дієвих прийомів формування у громадян правил безпечної поведінки в лісі.

Перспективи подальших досліджень полягають в подальшому аналізі причин виникнення лісових пожеж у лісах філії «Олевське лісове господарство» з урахуванням ефективності заходів протипожежної агітації та інформаційно-просвітницької роботи серед населення. Доцільним є оцінювання антропогенного впливу, рівня обізнаності відвідувачів лісів, а також результативності превентивних заходів у сучасних соціально-економічних та безпечних умовах.

Література

1. Валерко Р. А., Герасимчук Л. О., Примера І. О. Оцінка розміру шкоди для довкілля, спричинена військовими діями. *Таврійський науковий вісник*. 2022. № 126. С. 251–258. DOI: <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2022.126.35>
2. Ворон В. П., Мельник Є. Є., Сидоренко С. Г. Тенденції виникнення пожеж в лісах зеленої зони м. Харкова. *Проблеми пожежної безпеки* / НУГЗУ. 2012. Вип. 32. С. 37–42.
3. 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. Вип. 63. С. 216–220. DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.6-63.34>
4. Житова О. П., Андреева О. Ю., Турко В. М., Венгель С. М. Окремі аспекти охорони лісових ділянок та профілактики лісових пожеж Філії «Олевське лісове господарство». *Slovak international scientific journal*. 2024. № 82. Р. 28–32. DOI: 10.5281/zenodo.10952909
5. Житова О. П., Пінчук Ю. В., Нагорний В. А. Сучасний стан лісових пожеж в умовах бойових дій. The 1st International scientific and practical conference «Topical aspects of modern scientific research» (September 28–30, 2023). Tokyo, Japan : CPN Publishing Group, 2023. Р. 9–11.
6. Заверюха М. М. Лісова галузь в умовах воєнного стану. *Юридичний науковий електронний журнал*. 2022. № 5. С. 330–332. DOI <https://doi.org/10.32782/2524-0374/2022-5/76>.
7. Зібцев С.В., Сошенський О.М., Гуменюк В.В., Богомолів В. В. План інтегрованого управління ландшафтними пожежами у Луганській області. К.: НУБіП, 2023. 145 с.
8. Зібцев С.В., Сошенський О.М., Гуменюк В.В., Корень В. А. Багаторічна динаміка лісових пожеж. *Ukrainian journal of forest and wood science*. 2019. Vol. 10, № 3. Ст. 27–40.
9. Кірейцева Г. В., Хоменко С. В. Аналіз масштабів шкоди, завданої лісовими пожежами довкіллю та екосистемам внаслідок воєнних дій. *Лісові пожежі в умовах війни*: зб. тез доп. Круглого столу, м. Львів, 24 травня 2024 р. Львів: ЛДУ БЖД, 2024. С. 21–28 с.
10. Кузик А. Д., Лагно Д. В. Особливості процесу ліквідації пожежі у забруднених радіонуклідами лісах на території зони відчуження. *Пожежна безпека*. 2019. № 34. С. 47–53. DOI: 10.32447/20786662.34.2019.08
11. Кузик А. Д., Товарянський В. І. Вплив військових дій на лісові екосистеми України та їх післявоєнне відновлення. *Вісник ЛДУБЖД*. 2023. № 27. С. 16–22. DOI: 10.32447/20784643.27.2023.02
12. Пірогенна трансформація сосняків України / Ворон В. П., Коваль І. М., Сидоренко С. Г., Мельник Є. Є., Ткач О. М., Борисенко В. П., Тимошук І. В., Бологов О. Ю. Харків : ТОВ Планета-Прінт, 2021. 286 с.
13. Сидоренко С. Г., Сидоренко С. В. Аналіз горимості лісів України як передумова лісопожежного районування. Лісівництво і агролісництво. 2020. Вип. 137. С. 91–101. DOI:10.33220/1026-3365.137.2020.91
14. Сошенський О. М., Зібцев С. В., Терентьев А. Ю., Воротинський О. Г. Наслідки катастрофічних ландшафтних пожеж в Україні для лісових екосистем та населення. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*. 2021. 12(3). С. 21–34. doi.org/10.31548/forest2021.03.002
15. Охорона лісів від пожеж. URL.: <https://forest.gov.ua/napryamki-diyalnosti/lisove-gospodarstvo/ohorona-i-zahist-lisiv/ohorona-lisiv-vid-pozhezh>
16. Правила пожежної безпеки в лісах України. URL.: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0328-05#Text>
17. Публічний звіт голови Державного агентства лісових ресурсів України за 2024 рік. URL.: <https://forest.gov.ua/agentstvo/komunikaciyi-z-gromadskisty/publicni-zviti-derzhlisagentstva/publicnyi-zvit-holovy-derzhavnoho-agentstva-lisovykh-resursiv-ukrainy-za-2024-rik>
18. Global Forest Resources Assessment. 2015. Desk reference. Rome: FAO forestry paper. Retrieved from <http://www.fao.org/3/ai4808e.pdf>.
19. San-Miguel-Ayanz, J., Durrant, T., Boca, R., Maiani, P., Liberta' G., Artes Vivancos, T....& Leray, T., Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2019, EUR 30402 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg. 2020. 164 p. doi:10.2760/468688.
20. Soshenskiy, O., Zibtsev, S., Gumeniuk, V., Goldammer, J.G., Vasylyshyn, R., & Blyshchyk, V. The current landscape fire management in Ukraine and strategy for its improvement. *Environmental & Socio-economic Studies*. 2021. 9(2). С. 39–51. DOI: 10.2478/enviro-2021-0009.
21. Sydorenko S., Gumeniuk V., De Miguel-Diez F., Soshenskiy O., Budzinskiy I., Koren V. Assessment of the surface forest fuel load in the Ukrainian Polissia. *Fire Ecology*. 2024. Vol. 20(35). DOI: <https://doi.org/10.1186/s42408-024-00265-z>
22. Zibtsev S., Pasternak V., Vasylyshyn R., Myroniuk V., Sydorenko S., Soshenskiy O. Assessment of carbon emissions due to landscape fires in Ukraine during war in 2022. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*. 2024. Vol. 15(1). Р. 126–139. DOI: <https://doi.org/10.31548/forest/1.2024.126>
23. Zibtsev, S., Soshenskiy, O., Myroniuk V., & Gumeniuk, V. (2019). Monitoring of landscape fires of the Cross-border Ramsar Territory "Olmany-Perebrody" according to remote sensing. *Forestry and agroforestry*. 2019. Vol. 134. Р. 88–95.

Дата першого надходження статті до видання: 03.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

УДК 504.064.3:631.67:528.8(477.72)

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.2-65.39>

ВОЄННО ЗУМОВЛЕНА ДЕГРАДАЦІЯ ЗРОШУВАНИХ ЕКОСИСТЕМ ХЕРСОНСЬКОЇ ОБЛАСТІ: ГЕОІНФОРМАЦІЙНИЙ ТА ДИСТАНЦІЙНИЙ АНАЛІЗ

Пічура В.І., Потравка Л.О.

Херсонський державний аграрно-економічний університет

вул. Стрітенська, 23, 73006, м. Херсон

pichuravitalii@gmail.com

Представлено результати комплексної оцінки воєнно зумовленої деградації зрошуваних екосистем Херсонської області, що сформувалася внаслідок руйнування гідротехнічної інфраструктури, окупації територій та знищення Каховського водосховища як ключового джерела водозабезпечення Півдня України. Метою дослідження було встановлення просторово-часових закономірностей трансформації агроландшафтів у довоєнний і воєнний періоди на основі інтеграції геоінформаційного моделювання та даних дистанційного зондування Землі. Інформаційною базою дослідження стали супутникові знімки Sentinel-2, температурні продукти Sentinel-3 SLSTR, цифрова модель рельєфу SRTM, матеріали гідрогеолого-меліоративних досліджень і відкриті бази Copernicus. Аналіз виконано для липня 2021–2024 рр., що дозволило зіставити період активного функціонування зрошення, початок окупації, етап руйнування Каховської ГЕС і період повної відсутності водоподачі. Для оцінки екологічного стану території використано спектральні індекси NDVI, LAI, BSI, NDMI, DELC, NDMI_{STRESS} та показники температури підстильної поверхні (LST). Результати супутникового моніторингу засвідчили різке скорочення площ активної вегетації, деградацію рослинного покриву та розширення територій оголених ґрунтів. Встановлено критичне зростання водного стресу й евапотранспірації, підвищення температури підстильної поверхні, осушення водних об'єктів і зниження рівнів ґрунтових вод. Ідентифіковано осередки вторинного засолення, дефляційної деградації та масштабного пожежного ураження агроландшафтів і степових біотопів. Доведено, що припинення функціонування зрошувальних систем стало тригером каскадних деградаційних процесів, які охопили аграрні і природні екосистеми, включно з територіями природно-заповідного фонду. Встановлені тенденції свідчать про формування передумов підсилення аридизації та набуття ознак опустелювання територій колишнього зрошення. Використаний геоінформаційно-дистанційний підхід є ефективним інструментом моніторингу екологічного стану важкодоступних і окупованих територій та є важливим для оцінки екологічних збитків, планування повоєнного відновлення зрошення і розроблення адаптаційних стратегій природокористування. *Ключові слова:* зрошення, війна, клімат, водний стрес, деградація, дистанційне зондування Землі, геоінформаційне моделювання, Каховське водосховище.

War-induced degradation of irrigated ecosystems of the Kherson region: geoinformation and remote sensing analysis.

Pichura V., Potravka L.

The paper presents the results of a comprehensive assessment of war-induced degradation of irrigated ecosystems in the Kherson region, which developed as a consequence of the destruction of hydraulic infrastructure, occupation of territories, and the demolition of the Kakhovka Reservoir as the key water supply source for Southern Ukraine. The aim of the study was to identify spatial and temporal patterns of agrolandscape transformation during pre-war and wartime periods based on the integration of geoinformation modeling and Earth remote sensing data. The information base of the research included Sentinel-2 satellite imagery, Sentinel-3 SLSTR land surface temperature products, SRTM digital elevation model, hydrogeological and land reclamation survey materials, and Copernicus open databases. The analysis covered July 2021–2024, enabling comparison of the period of active irrigation functioning, the onset of occupation, the stage of the Kakhovka HPP destruction, and the period of complete cessation of water supply. To assess the ecological condition of the territory, spectral indices NDVI, LAI, BSI, NDMI, DELC, and NDMI_{STRESS}, as well as land surface temperature (LST), were applied. Satellite monitoring results revealed a sharp reduction in active vegetation areas, degradation of plant cover, and expansion of bare soil territories. A critical increase in water stress and evapotranspiration, rising land surface temperatures, drying of water bodies, and lowering groundwater levels were identified. Foci of secondary salinization, deflation degradation, and large-scale fire damage of agrolandscapes and steppe biotopes were detected. It has been proven that the termination of irrigation system functioning became a trigger for cascading degradation processes affecting both agricultural and natural ecosystems, including protected areas. The identified trends indicate the formation of preconditions for intensified aridization and the emergence of desertification features within formerly irrigated territories. The applied geoinformation and remote sensing approach has proven to be an effective tool for environmental monitoring of hard-to-reach and occupied territories and is important for assessing environmental damage, planning post-war irrigation restoration, and developing adaptive nature management strategies. *Key words:* irrigation, war, climate, water stress, land degradation, Earth remote sensing, geoinformation modeling, Kakhovka Reservoir.

Постановка проблеми. У сучасних умовах глобальних кліматичних змін і зростання техногенного навантаження особливої гостроти набуває деградація водоресурсного потенціалу територій, що

супроводжується зниженням природного вологозабезпечення, порушенням гідрологічного балансу та трансформацією екосистем [1]. Для степової зони України водний дефіцит є ключовим ліміту-



© Пічура В.І., Потравка Л.О., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

ючим чинником функціонування агроландшафтів, оскільки природна кількість атмосферних опадів не покриває біологічних потреб рослинності [2]. За таких умов зрошувальні меліорації виступають базовим інструментом стабілізації аграрного виробництва, підтримання біопродуктивності ґрунтів і формування сприятливих мікрокліматичних умов [3, 4].

Ситуація набула критичного характеру внаслідок повномасштабної військової російської агресії проти України, що призвела до окупації понад 80% площ зрошуваних земель [5], руйнування гідротехнічної інфраструктури та знищення Каховського водосховища – ключового джерела водозабезпечення Півдня України. Це спричинило системну екологічну кризу, пов'язану з осушенням територій, деградацією рослинного покриву, активізацією засолення ґрунтів і порушенням функціонування природних та аграрних екосистем [3, 5, 6-9].

Актуальність дослідження. Актуальність зумовлена необхідністю оцінки масштабів і встановлення просторових закономірностей воєнно зумовленої деградації зрошуваних екосистем, визначення екологічних наслідків втрати зрошення та формування наукової основи для повоєнного відновлення територій. Особливої ваги набуває моніторинг природних ресурсів в зоні активних бойових дій та на тимчасово окупованих територіях, де проведення традиційних польових досліджень є обмеженим або неможливим. У таких умовах пріоритетного значення набувають методи дистанційного зондування Землі та геоінформаційного аналізу, які забезпечують оперативну оцінку трансформації ландшафтів, водного стресу, стану рослинності й температурного режиму підстильної поверхні.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження виконано у межах наукових напрямів, пов'язаних із оцінкою екологічного стану агроландшафтів, моніторингом деградаційних процесів ґрунтового покриву та аналізом впливу кліматичних змін і воєнних дій на природно-ресурсний потенціал територій. Отримані результати орієнтовані на розв'язання науково-прикладних завдань, зокрема: оцінювання екологічних збитків, завданих зрошуваним екосистемам; визначення просторових масштабів критичного водного стресу; обґрунтування заходів повоєнного відновлення зрошення; розроблення адаптаційних стратегій землекористування в умовах кліматичних ризиків і воєнних наслідків; інформаційне забезпечення планування відновлення деокупованих територій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика водного дефіциту, деградації зрошуваних земель і трансформації агроландшафтів в умовах кліматичних змін широко висвітлена у працях вітчизняних і зарубіжних учених [1, 3, 5,

6-11]. Значна частина досліджень присвячена оцінці водного стресу та його впливу на функціонування екосистем [5], урожайність сільськогосподарських культур [12, 13] і соціально-економічний розвиток територій [14]. Окремий науковий напрям сформували роботи, що обґрунтовують застосування дистанційного зондування Землі для моніторингу стану довкілля [15-19]. До повної масштабної війни особлива увага зосереджувалася на функціонуванні зрошувальних систем Півдня України, їх впливі на ґрунтоутворні процеси, біопродуктивність земель і регіональний мікроклімат. Водночас новітній науковий дискурс посилюється дослідженнями екологічних наслідків війни [3, 5, 6-9, 11, 14] – руйнування гідротехнічних споруд, порушення водного режиму та деградації природних ресурсів.

Невирішені раніше частини загальної проблеми. Попри значну кількість наукових праць, присвячених комплексній оцінці воєнного впливу на довкілля, питання деградації зрошуваних екосистем Півдня України залишаються недостатньо опрацьованими. Найменш дослідженими є просторово-часові закономірності трансформації агроландшафтів після руйнування Каховського водосховища, оцінка водного стресу на тимчасово окупованих територіях, зміни температури підстильної поверхні в умовах припинення зрошення, а також масштаби та локалізація процесів вторинного засолення, дефляційної деградації й пожежної небезпеки, вплив втрати зрошення на природні екосистеми та об'єкти природно-заповідного фонду. Відсутність фізичного доступу до окупованих територій істотно обмежує можливості отримання достовірних польових даних і зумовлює необхідність активного застосування супутникових методів дослідження.

Новизна дослідження. Наукова новизна одержаних результатів полягає у комплексній оцінці воєнно зумовленої деградації зрошуваних екосистем Херсонської області на основі інтеграції геоінформаційного моделювання та даних дистанційного зондування Землі. У межах дослідження здійснено просторово-часовий аналіз трансформації зони зрошення у довоєнний і воєнний періоди (2021–2024 рр.); встановлено закономірності змін рослинного покриву, евапотранспірації та водного стресу після втрати зрошення; виявлено осередки вторинного засолення та дефляційної деградації ґрунтів; визначено тенденції підвищення температури підстильної поверхні в умовах осушення територій; оцінено вплив деградаційних процесів на природні екосистеми, включно з об'єктами природно-заповідного фонду. Отримані результати формують науково-інформаційну основу для екологічної оцінки збитків і планування відновлення зрошуваного землеробства Півдня України.

Методологічне та загальнонаукове значення дослідження. Методологічне значення роботи полягає у використанні комплексного підходу до оцінки воєнно зумовленої деградації зрошуваних екосистем на основі поєднання геоінформаційного моделювання, даних дистанційного зондування Землі та індикаторів природно-кліматичної трансформації територій. Запропонована методика інтегрує спектральні індекси стану рослинності, вологості та деградації ґрунтів із температурними показниками підстильної поверхні, що забезпечує багатофакторний просторово-часовий аналіз екологічного стану агроландшафтів. На відміну від традиційних польових підходів, методика є важливою для моніторингу важкодоступних і тимчасово окупованих територій, де наземні обстеження є обмеженими або неможливими, і тим самим розширює інструментарій сучасної екології, ландшафтознавства та природокористування в умовах воєнних дій.

Загальнонаукове значення дослідження полягає у поглибленні уявлень про закономірності функціонування зрошуваних екосистем у зоні ризикового землеробства та їх трансформацію під впливом кліматичних і воєнно-техногенних чинників. Отримані результати дозволили простежити причинно-наслідкові зв'язки між втратою гідротехнічного водозабезпечення, змінами водного балансу й температурного режиму, деградацією рослинного покриву та розвитком деградаційних процесів ґрунтів. Запропонований підхід забезпечує аналітичну основу для екологічного моніторингу зрошуваних територій, оцінювання наслідків руйнування гідротехнічної інфраструктури, моделювання водного стресу агроландшафтів, аналізу процесів аридизації та проявів опустелювання, а також для обґрунтування адаптаційних повоєнної стратегій землекористування. Універсальність підходу ґрунтується у доцільності його застосування для інших територій, що зазнали воєнних дій, гідрологічних катастроф та втрати систем штучного зволоження.

Джерела даних і матеріали дослідження. Інформаційною основою дослідження стали супутникові знімки Sentinel-2 L2A (просторова роздільна здатність 10 м), температурні продукти Sentinel-3 SLSTR L1B, цифрова модель рельєфу SRTM (30 м), матеріали гідрогеолого-меліоративних досліджень, дані про мережу зрошувальних систем, а також відкриті ресурси Copernicus Browser. Аналіз виконано для липня 2021–2024 рр., що забезпечило порівняльність за однаковим фенологічним періодом і дозволило зіставити довоєнний період активного зрошення (2021), період початку окупації (2022), період руйнування Каховської ГЕС (2023) та період відсутності зрошення (2024). Для обробки добиралися безхмарні супутникові знімки.

Етапи дослідження. Дослідження включали вісім послідовних етапів: 1 – аналіз трансформації рослинного покриву за індексами BSI, LAI, NDVI, DELC, NDMI_{STRESS}; 2 – оцінювання змін температури підстильної поверхні (LST); 3 – аналіз стану водних об'єктів; 4 – виявлення проявів засолення та осолонцювання ґрунтів; 5 – ідентифікація пожежної небезпеки; 6 – аналіз проявів вітрової ерозії; 7 – оцінка впливу деградаційних процесів на природно-заповідні території; 8 – візуалізація природно-кліматичної трансформації за сценаріями супутникових зображень.

Індекси дистанційного зондування. Для оцінки стану рослинності, вологості та деградаційних процесів використано спектральні індекси Sentinel-2 [5, 15-19]: BSI (Bare Soil Index) – для ідентифікації оголених ґрунтів; LAI (Leaf Area Index) – для оцінювання щільності листової поверхні та біомаси; NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – для визначення стану та активності вегетації; DELC (Detection of Evapotranspiration Levels Composite) – для оцінювання евапотранспірації та випаровування; NDMI_{STRESS} (Normalized Difference Moisture Index for Crop Moisture Stress) – для характеристики водного стресу та зрошуваності агроценозів; NDMI (Normalized Difference Moisture Index) – для оцінювання вологості рослинного покриву.

Температура підстильної поверхні. Для аналізу теплового режиму використано дані приладу SLSTR супутника Sentinel-3. Канал F2 (10,854 мкм) у тепловому інфрачервоному діапазоні (просторова роздільна здатність 270 м) застосовано для визначення просторово-часових змін Land Surface Temperature (LST). Порівняльний аналіз проведено для липня як періоду пікових температур і максимального водного стресу, що забезпечило коректність зіставлення довоєнних і воєнних умов функціонування зрошуваних екосистем.

Характеристика території дослідження. Об'єктом дослідження є зрошувані екосистеми Херсонської області, розташовані на півдні України в межах Причорноморської низовини (рис. 1).

Регіон належить до степової природно-кліматичної зони та характеризується високими температурами повітря, низькою кількістю атмосферних опадів і значним дефіцитом природного вологозабезпечення. Загальна площа області становить 2 846,1 тис. га, з яких 1 971,0 тис. га (69,3%) – землі сільськогосподарського призначення, у тому числі рілля – 1 777,6 тис. га. Ґрунтовий покрив представлений переважно південними чорноземами та темно-каштановими ґрунтами. Територія має високий рівень розораності та значну залежність агровиробництва від штучного зволоження. Проектна площа зрошуваних земель області становила 426,4 тис. га, а фактичне використання

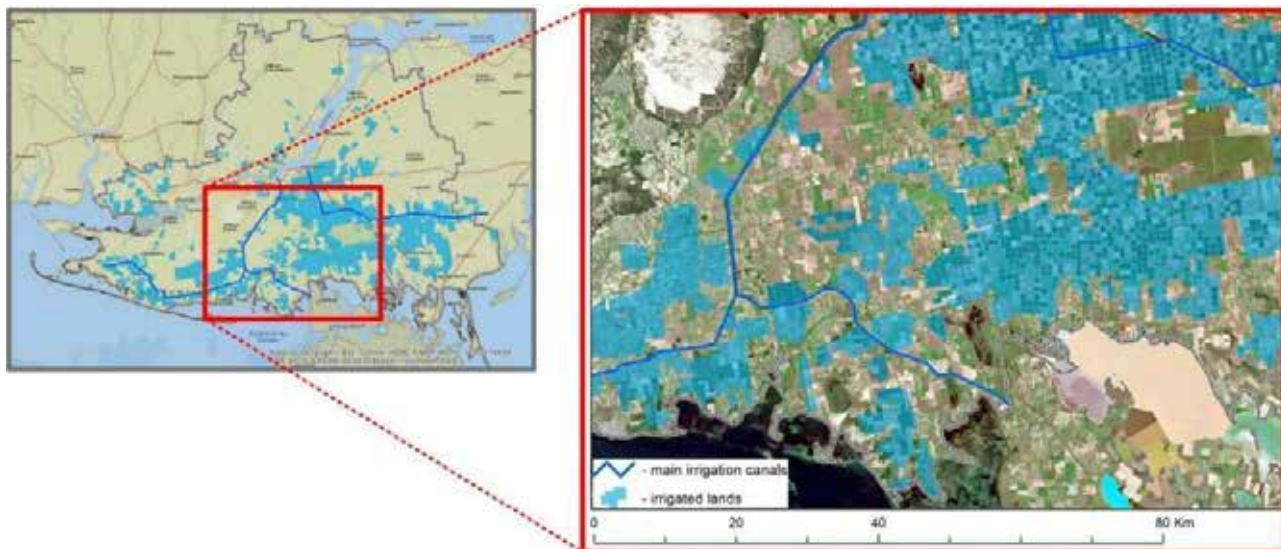


Рис. 1. Розміщення зрошуваних земель і магістральних зрошувальних каналів у межах лівобережжя Херсонської області (червоним кольором виділена територія дослідження)

у 2003–2021 рр. – 250–315 тис. га. Основні зрошувальні системи зосереджені на лівобережжі Дніпра (Каховська, Каланчацька, Краснознам'янська), джерелом водопостачання яких було Каховське водосховище; частина Інгулецької зрошувальної системи функціонувала на правобережжі області. Клімат регіону посушливий: середньорічна кількість опадів становить 300–500 мм, причому у кожен другий рік їх кількість є критично низькою (<400 мм). Потенційна евапотранспірація у два рази перевищує надходження атмосферних опадів, що обумовлює природну аридизацію території.

Викладення основного матеріалу. До початку повномасштабних воєнних дій зрошуване землеробство було визначальним чинником функціонування аграрного сектору Херсонської області та важливою складовою продовольчої безпеки Півдня України. У довоєнний період фактична площа зрошення в Україні перевищувала 550 тис. га, а основна частка зрошуваних земель зосереджувалася у степовій зоні. Води Каховського водосховища забезпечували зрошення близько 77% зрошуваних земель держави. У межах Херсонської області станом на 2021 рік зрошувальні системи забезпечували полив близько 315 тис. га сільськогосподарських угідь, що сприяло підвищенню урожайності зернових культур до 3,8–5,4 т/га порівняно з 2,4 т/га на незрошуваних землях, а також формувало сприятливі мікрокліматичні умови територій зони зрошення.

Руйнування гідротехнічної інфраструктури, окупація лівобережжя Херсонської області та знищення Каховського водосховища призвели до фактичного припинення функціонування зрошувальних систем і стали тригером масштабної природно-антропоген-

ної трансформації агроландшафтів. Втрата штучного зволоження спричинила різке погіршення стану рослинного покриву, що узгоджується з результатами дешифрування супутникових знімків Sentinel-2 за індексами BSI, LAI та NDVI (рис. 2). У липні 2021 року, за умов активного зрошення, територія характеризувалася високими значеннями вегетаційних індексів, що відповідало щільному рослинному покриву та інтенсивній вегетації агроценозів. У 2022 році, після початку окупації, зафіксовано скорочення площ оброблюваних земель приблизно на 60%. У 2023 році, після руйнування дамби Каховської ГЕС, площі сільськогосподарського виробництва зменшилися на 80% порівняно з довоєнним періодом. Станом на липень 2024 року лише близько 7% сільськогосподарських земель використовувалися у виробництві, тоді як переважна частина територій характеризувалася оголеними ґрунтами, сухостоєм або деградованою степовою рослинністю; частка площ із розвиненим рослинним покривом не перевищувала 20%.

Деградація рослинності безпосередньо відобразилася на водному балансі та процесах евапотранспірації. Аналіз індексів DELC і $NDMI_{STRESS}$ засвідчив різке посилення водного стресу у зоні припиненого зрошення (рис. 3).

Якщо у 2021 році близько 80% площ характеризувалися низьким або помірним рівнем випаровування, що відповідало відносно сприятливим умовам вегетації, то у 2024 році понад 80% земель сільськогосподарського призначення мали високі значення евапотранспірації, з яких близько 20% перебували у стані критичного дефіциту ґрунтової вологи. Осередки відносного збереження зво-

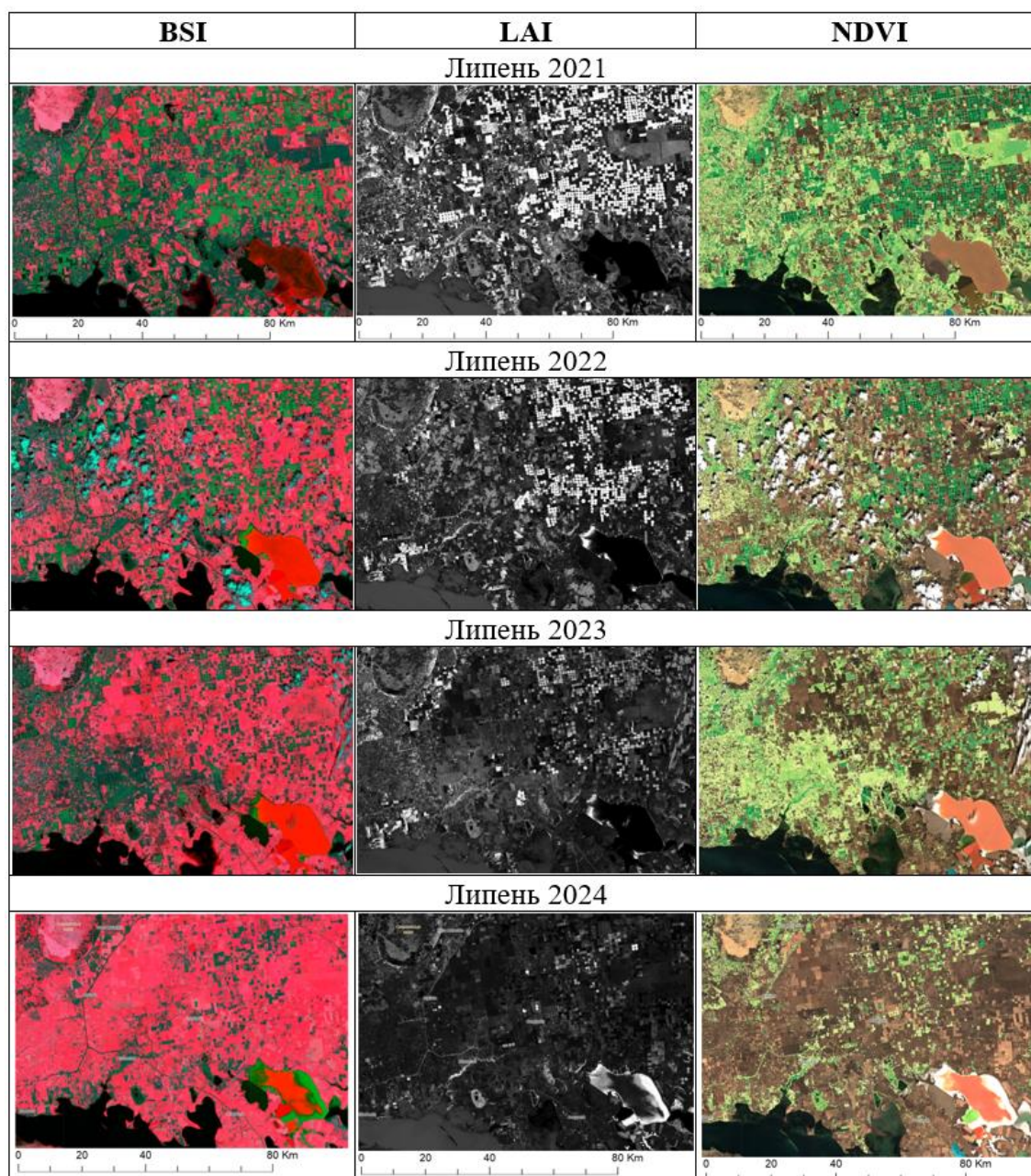


Рис. 2. Просторово-часова динаміка стану рослинного покриву та оголеності ґрунтів у зоні зрошення лівобережжя Херсонської області за індексами BSI, LAI та NDVI (липень 2021–2024 рр.), дані Sentinel 2 L2A

Спектральні індекси: BSI – індекс оголеності ґрунтів, де червоні відтінки відповідають оголеним поверхням і сухостою, тоді як зелені – ділянкам, вкритим рослинністю активною вегетацією. LAI – індекс щільності листової поверхні: білі тони відображають зрошувані агроценози з високою біомасою, сірі – природну рослинність і посіви на незрошуваних землях. NDVI – індекс стану вегетації, де відтінки зеленого характеризують рослинність різної інтенсивності розвитку, а коричневі – оголені ґрунти та сухостій.

ложення фіксувалися локально – у прибережних смугах, вздовж зрошувальних каналів, у зонах близького залягання ґрунтових вод і на ділянках із лісосмугами.

Посилення водного стресу супроводжувалося суттєвими змінами теплового режиму підстильної поверхні. Аналіз даних Sentinel-3 SLSTR виявив негативні просторово-часові тенденції підвищення

Land Surface Temperature (LST) у межах колишньої зони зрошення (рис. 4).

Упродовж 2021–2024 рр. встановлено середній тренд зростання температури поверхні на +9,0 °C. Максимальні значення LST підвищилися з 39 °C у 2021 році до 56 °C у 2024 році, а локально температура поверхні ґрунту досягала 67 °C. Такі показники свідчать про формування екстремального

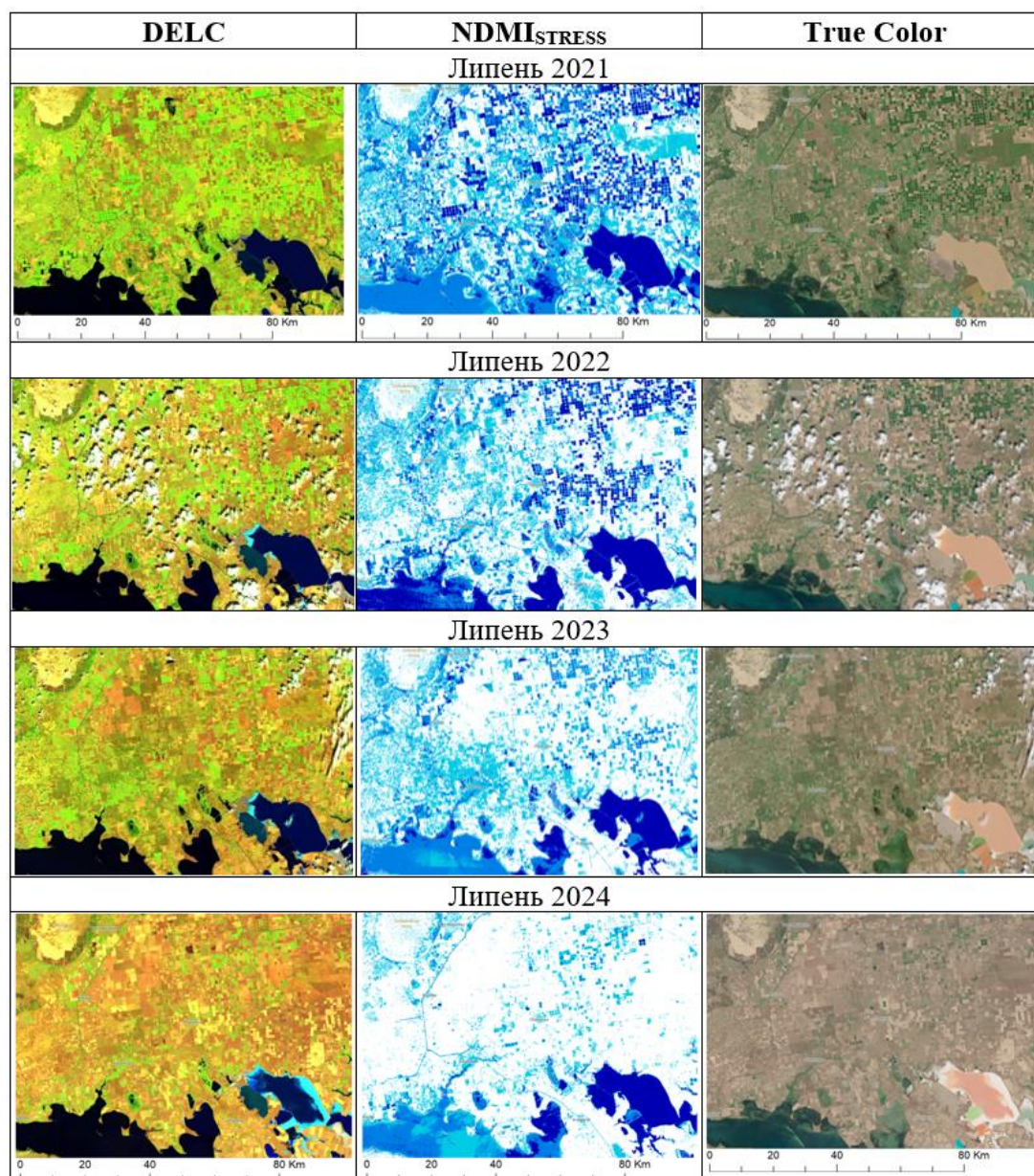


Рис. 3. Просторово-часова динаміка водного стресу та евапотранспірації у зоні зрошення лівого бережжя Херсонської області за індексами DELС і NDMI_{STRESS} (липень 2021–2024 рр.), дані Sentinel 2 L2A

Спектральні індекси: DELС – інтенсивність евапотранспірації (зелені відтінки – зволожені ділянки, жовто-коричневі – посушливі). NDMI_{STRESS} – рівень водного стресу (білий колір – високий, світло-блакитні – низький, темно-сині – відсутній стрес). True Color – природне кольорове відображення поверхні. Простежується поступове зростання водного стресу, посилення випаровування та деградація угідь в зоні зрошення у воєнний період, особливо після припинення функціонування систем зрошення.

теплового навантаження, що посилює дисбаланс водного режиму, прискорює дегідратацію ґрунту та пригнічує розвиток рослинності.

Паралельно відбулися суттєві зміни у водному фонді території. Втрата Каховського водосховища спричинила осушення каналів, зниження водності малих річок і деградацію водойм. За результатами дешифрування супутникових знімків встановлено обміління річки Каланчак та погіршення якості води до рівня, непридатного для водоспоживання.

Осушення водних об'єктів супроводжувалося зниженням рівня ґрунтових вод, що активізувало процеси вторинного засолення ґрунтів. Унаслідок випаровування мінералізованих ґрунтових вод відбувалося переміщення солей у верхні горизонти ґрунтового профілю; на супутникових знімках засолені землі проявлялися світло-сірими та білими контурами (рис. 6). Зафіксовано розширення площ вторинного засолення й осолонцювання, а площі окремих осередків виходу солей на поверхню коли-

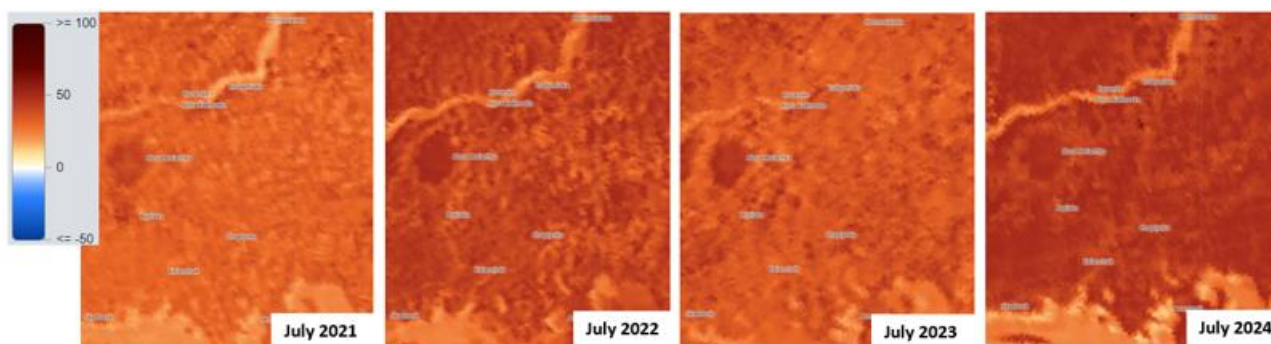


Рис. 4. Динаміка температури підстильної поверхні (LST) у зоні зрошення лівобережжя Херсонської області за даними супутникового моніторингу (2021–2024 рр.)

Примітка: шкала кольорів відображає градації температури підстильної поверхні: від нижчих значень (світлі тони) до підвищених і екстремальних (темно-червоні). Встановлено стійку тенденцію підвищення температурного фону та розширення осередків екстремального теплового навантаження у межах колишньої зони зрошення, що корелює з припиненням водоподачі та деградацією рослинного покриву.



Рис. 5. Осушення водних об'єктів на тимчасово окупованій території лівобережжя Херсонської області, дані Sentinel 2 L2A

Примітка: Простежується істотне зниження рівня води, оголення донних відкладів і деградація прибережних ландшафтів унаслідок руйнування гідротехнічної інфраструктури та припинення водоподачі.

валися від 1 до понад 400 га. Такі процеси супроводжуються погіршенням агрохімічних властивостей ґрунтів і втратою їх продуктивності.

Осушення території, оголення ґрунтового покриву та аномально високі температури зумовили різке зростання пожежної небезпеки. У літньо-осін-

ній період 2024 року зафіксовано масштабні пожежі агроландшафтів, степових біотопів і лісосмуг на площі понад 200 тис. га (рис. 7). Водночас відсутність рослинного покриву та пориви вітру швидкістю 20–30 м/с активізували процеси вітрової ерозії; зафіксовані втрати ґрунту досягали 600 т/га (рис. 8),



Рис. 6. Осередки засолення та осолонцювання ґрунтів на лівобережжі Херсонської області (2024 р.), дані Sentinel 2 L2A

Примітка: відображено просторову локалізацію процесів вторинного засолення та осолонцювання земель у межах лівобережної частини Херсонської області станом на 23 вересня 2024 року. Площа спостереження складає 40 тис. га.



Рис. 7. Осередки пожеж (чорні відтінки) в агроландшафтах Херсонської області за супутниковими даними (2024 р.), дані Sentinel 2 L2A

що вказує на катастрофічний рівень дефляційної деградації.

Деградаційні процеси поширилися і на природні екосистеми. Значна частина об'єктів природно-заповідного фонду області опинилася у зоні окупації та під впливом порушення гідрологічного режиму. На прикладі біосферного заповідника «Асканія-Нова» встановлено зниження зволоження рослинності, вигорання степових біотопів, зростання

пожежної небезпеки та зниження біопродуктивності (рис. 9).

Зміни індексу NDMI засвідчили формування осередків критичного водного стресу навіть у природоохоронних ландшафтах, які раніше отримували додаткове іригаційне підживлення через гідрологічний перерозподіл зрошувальних вод.

Обговорення результатів. Отримані результати свідчать, що деградація зрошуваних екосис-



Рис. 8. Прояви вітрової ерозії (дефляції) на лівобережжі Херсонської області (2024 р.), дані Sentinel-2 L2A; фотофіксація

Примітка: представлено супутникові та наземні свідчення розвитку вітрової ерозії на території лівобережної частини Херсонської області у 2024 році. Фіксується формування пилових шлейфів, оголення ґрунтового покриву та переміщення дрібнодисперсних часток унаслідок осушення територій, деградації рослинності та посилення аридизаційних процесів.

тем Херсонської області має комплексний характер і зумовлена поєднанням кліматичних змін та воєнно-техногенних чинників. Припинення функціонування зрошувальних систем після руйнування гідротехнічної інфраструктури та Каховського водосховища стало ключовим тригером каскадних деградаційних процесів (рис. 10).

Супутниковий моніторинг підтвердив різке зниження продуктивності рослинного покриву та скорочення площ активної вегетації, що посилює випаровування і водний стрес та, відповідно, активізувало аридизаційні тенденції. Підвищення температури підстильної поверхні є закономірним наслідком втрати зрошення і деградації рослинності: зменшення транспіраційного охолодження сприяло зростанню теплового навантаження та загостренню дефіциту вологи. Осушення водних об'єктів і зниження рівнів ґрунтових вод засвідчують руйнування сформованої гідрологічної системи території, що підсилює ризики вторинного засолення та довготривалої втрати біокліматичної стійкості ґрантів. Оголення поверхні й високі температури також створили передумови для масштабних пожеж і дефляції,

що формує стійкі екологічні ризики та може прискорювати процеси опустелювання. Виявлені зміни у природно-заповідних ландшафтах підтверджують, що зрошення виконувало важливу агровиробничу та екосистемну регуляторну функцію у підтриманні водного та теплового режимів регіону.

Головні висновки. Зрошення екосистеми Херсонської області зазнали масштабної природно-антропогенної деградації внаслідок поєднання воєнного та кліматичного впливу, осушення Каховського водосховища і руйнування гідротехнічної інфраструктури. Припинення зрошення спричинило різке скорочення площ агровиробництва, деградацію рослинного покриву та розширення територій оголених і малопродуктивних ґрунтів, частка яких перевищила 80% досліджуваної зони. За результатами аналізу індексів дистанційного зондування встановлено критичне посилення водного стресу та евапотранспірації, а також стійку тенденцію підвищення температури підстильної поверхні (середній тренд близько $+9^{\circ}\text{C}$; максимальні значення $56\text{--}67^{\circ}\text{C}$), що відображає термодеградацію ландшафтів і порушення водного балансу. Осушення водосхо-

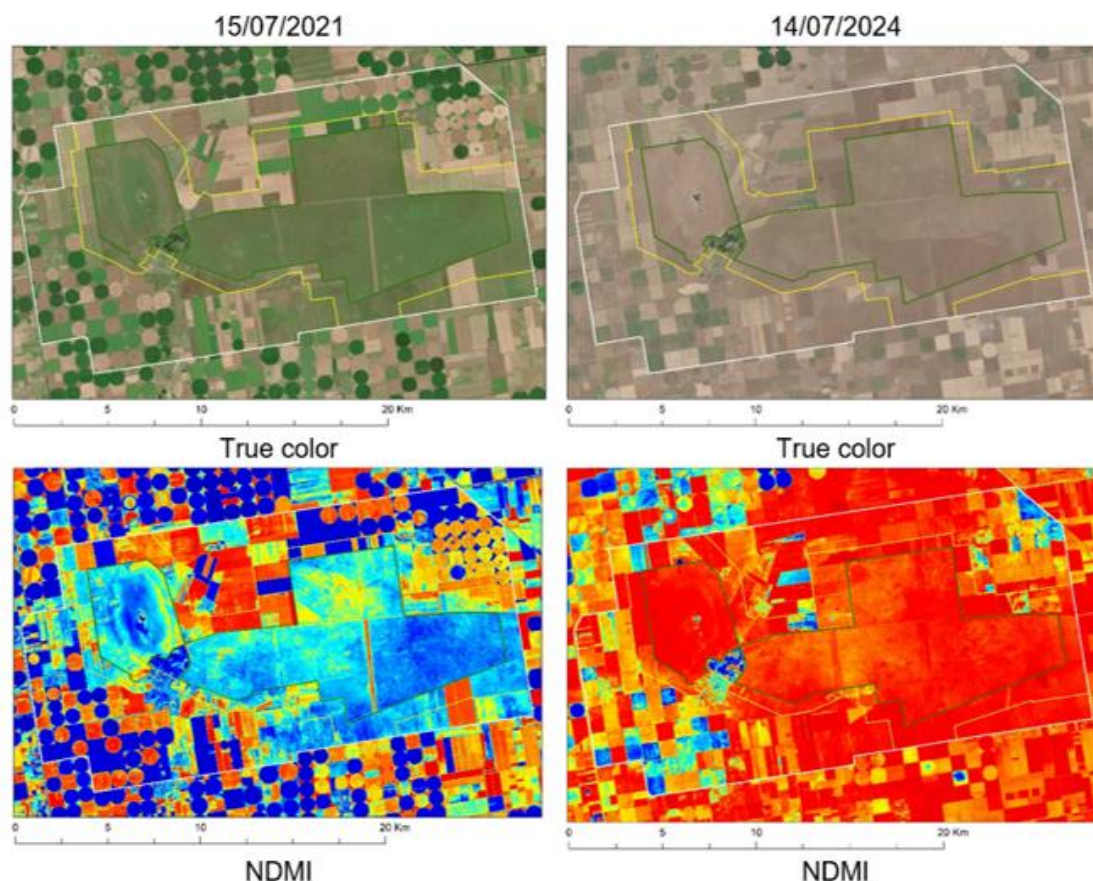


Рис. 9. Динаміка зволоження рослинного покриву на території Біосферного заповідника «Асканія-Нова» за індексом NDMI (2021 і 2024 рр.), дані Sentinel-2 L2A

Примітка: представлено просторово-часові зміни рівня зволоження та стану рослинного покриву в межах Біосферного заповідника «Асканія-Нова» у 2021 і 2024 рр. за даними індексу Normalized Difference Moisture Index (NDMI) у поєднанні з природним відображенням поверхні (True Color). Встановлено зростання площ із дефіцитом вологи та ознаками вигорання рослинності, що пов'язано з припиненням іригаційного підживлення, посиленням аридизаційних процесів та воєнних дій.

NDMI: червоні відтінки – території з критичним водним стресом, сухою рослинністю або її відсутністю; жовті – низький рівень зволоження і пригнічена вегетація; бірюзові – задовільне зволоження та помірна вегетація; сині – високий рівень зволоження і добра вегетація.

вища зумовило деградацію водного фонду, активізацію вторинного засолення, дефляції та пожежної небезпеки, що супроводжувалося значними дефляційними втратами родючого шару ґрунтів і погіршенням агроекологічного стану зони зрошення. Використаний геоінформаційно-дистанційний підхід є важливим для моніторингу екологічного стану важкодоступних і окупованих територій та ефективним для оцінки екологічних збитків, розроблення заходів повоєнного відновлення зрошення і формування адаптаційних стратегій природокористування в умовах кліматичних і воєнних ризиків.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати доцільно використовувати для екологічного моніторингу зрошуваних територій, оцінки воєнно зумовлених збитків при-

родним ресурсам, обґрунтування заходів важливості повоєнного відновлення гідротехнічної інфраструктури та планування адаптаційних стратегій землекористування в умовах кліматичних змін. Геоінформаційно-дистанційний підхід доцільно застосовувати для оперативного аналізу стану агроландшафтів на важкодоступних і тимчасово окупованих територіях.

Подяки

The research is supported by the Canadian Institute of Ukrainian Studies (CIUS) of the University of Alberta from the Ihor Roman Bukowsky Sustainable Development Endowment Fund.

The project was supported by Documenting Ukraine, a program of the Institute for Human Sciences, IWM Vienna.

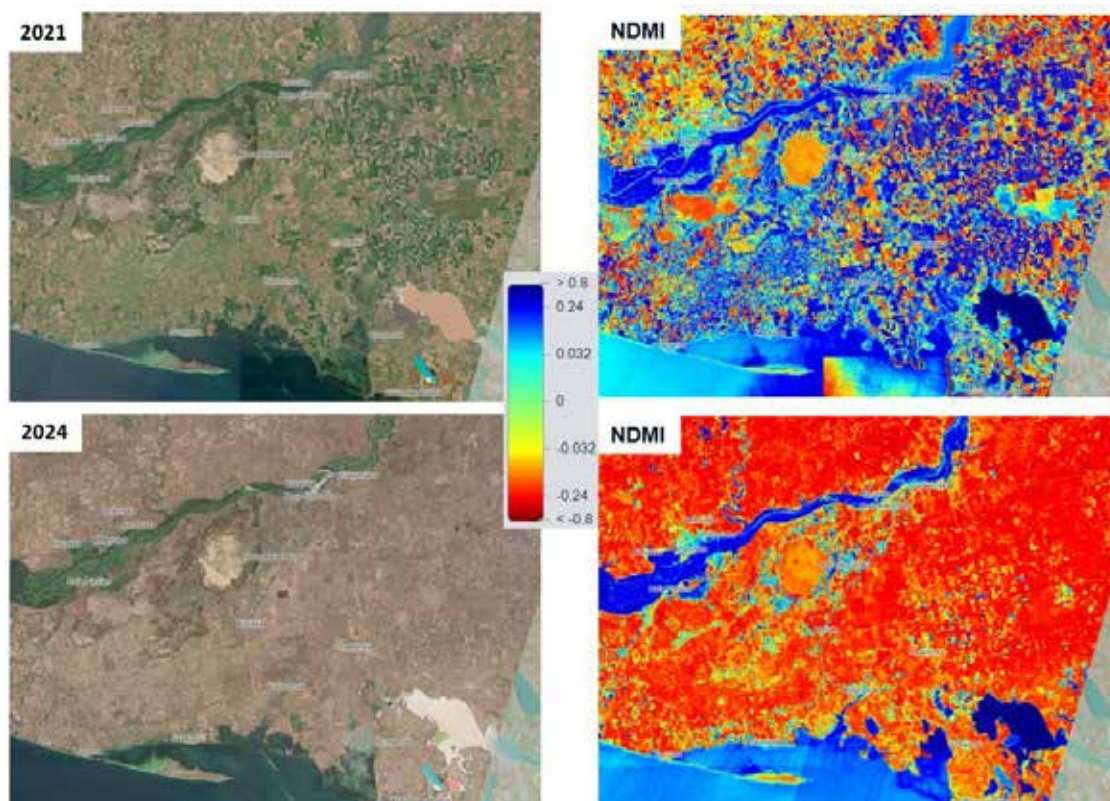


Рис. 10. Природно-кліматична трансформація території зрошуваного землеробства Херсонської області за індексом NDMI (2021 і 2024 рр.), дані Sentinel-2 L2A

Примітка: знімки зліва відображають природне кольорове відображення поверхні (True Color), справа – розподіл індексу зволоження Normalized Difference Moisture Index (NDMI). Простежується різке скорочення площ із достатнім рівнем вологості, посилення водного стресу, деградація рослинного покриву та аридизація агроландшафтів унаслідок припинення функціонування зрошення у воєнний період.

Література

1. Dikshit A., Pradhan B., Alamri A. M. Long lead time drought forecasting using lagged climate variables and a stacked long short-term memory model. *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 755 (2). 142638. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142638>
2. Pichura V., Potravka L., Vdovenko N., Biloshkurenko O., Strachuk N., Baysha K. Changes in climate and bioclimatic potential in the Steppe Zone of Ukraine. *Journal of Ecological Engineering*. 2022. Vol. 23 (12). P. 189–202. <https://doi.org/10.12911/22998993/154844>
3. Romashchenko M., Faybishenko B., Onoprienko D., Hapich H., Novitskyi R., Dent D., Saidak R., Usatyi S., Roubik H. Prospects for restoration of Ukraine's irrigation system. *Water International*. 2025. Vol. 50 (2). P. 104–120. <https://doi.org/10.1080/02508060.2025.2472718>
4. Pichura V., Potravka L., Dudiak N., Stroganov A., Dyudyaeva O. Spatial differentiation of regulatory monetary valuation of agricultural land in conditions of widespread irrigation of steppe soils. *Journal of Water and Land Development*. 2021. No. 48 (I–III). P. 182–196. <https://doi.org/10.24425/jwld.2021.136161>
5. Pichura V., Potravka L. Impact of war on natural and climatic transformation of territories in the irrigation zone of Ukraine. *Discover Applied Sciences*. 2025. Vol. 7. 783. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07404-4>
6. Hapich H., Novitskyi R., Onoprienko D., Dent D., Roubik H. Water security consequences of the Russia–Ukraine war and the post-war outlook. *Water Security*. 2024. Vol. 21. 100167. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2024.100167>
7. Shumilova O., Tockner K., Sukhodolov A. et al. Impact of the Russia–Ukraine armed conflict on water resources and water infrastructure. *Nature Sustainability*. 2023. Vol. 6. P. 578–586. <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01068-x>
8. Vyshnevskiy V., Shevchuk S., Komorin V., Oleynik Yu., Gleick P. The destruction of the Kakhovka dam and its consequences. *Water International*. 2023. Vol. 48 (5). P. 631–647. <https://doi.org/10.1080/02508060.2023.2247679>
9. Vyshnevskiy V., Shevchuk S. The destruction of the Kakhovka dam and the future of the Kakhovske reservoir. *International Journal of Environmental Studies*. 2024. Vol. 81 (1). P. 275–288. <https://doi.org/10.1080/00207233.2024.2320033>
10. Felice M. Di, Soares M. B., Alessandri A., Troccoli A. Scoping the potential usefulness of seasonal climate forecasts for solar power management. *Renewable Energy*. 2019. Vol. 142. P. 215–223. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.134>
11. Pichura V., Potravka L., Stoiko N., Dudych H. Scenarios for the functioning of the Kakhovka Reservoir territory. *Journal of Landscape Ecology*. 2025. Vol. 18 (3). P. 118–154. <https://doi.org/10.2478/jlecol-2025-0023>

12. Domaratskiy E. O., Bazaliy V. V., Domaratskiy O. O., Dobrovolskiy A. V., Kyrychenko N. V., Kozlova O. P. Influence of mineral nutrition and combined growth regulating chemical on nutrient status of sunflower. *Indian Journal of Ecology*. 2018. Vol. 45 (1). P. 126–129.
13. Domaratskiy Ye., Kozlova O., Kaplina A. Economic efficiency of applying environmentally friendly fertilizers in production technologies in the South of Ukraine. *Indian Journal of Ecology*. 2020. Vol. 47 (3). P. 624–629.
14. Potravka L., Pichura V., Melnyk V. Results of the sociological research “Kakhovka reservoir: past, present, and future”. *Vodni bioresursy ta akvakultura*. 2025. No. 2 (18). P. 204–223. <https://doi.org/10.32782/wba.2025.2.12>
15. Nguyen C. T., Chidthaisong A., Diem P. K., Huo L.-Z. A modified bare soil index to identify bare land features during agricultural fallow-period in Southeast Asia using Landsat 8. *Land*. 2021. Vol. 10. P. 2–17. <https://doi.org/10.3390/land10030231>
16. Boegh E., Soegaard H., Broge N., Hasager C. B., Jensen N. O., Schelde K., Thomsen A. Airborne multispectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration, and photosynthetic efficiency in agriculture. *Remote Sensing of Environment*. 2002. Vol. 81 (2–3). P. 179–193. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00342-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00342-X)
17. Ashok A., Rani H. P., Jayakumar K. V. Monitoring of dynamic wetland changes using NDVI and NDWI based Landsat imagery. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2021. Vol. 23. 100547. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100547>
18. Azcon-Bieto J., Talon M. *Fundamentos de fisiologia vegetal*. 2nd ed. Madrid : McGraw-Hill Interamericana, 2013. 669 p.
19. Tibangayuka N., Mulungu D. M. M., Izdori F. Analysis of spatiotemporal surface water variability and drought conditions using remote sensing indices in the Kagera River Sub-Basin, Tanzania. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2025. Vol. 37. 101405. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101405>

Дата першого надходження статті до видання: 03.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

БІОМОНІТОРИНГ МИСЛИВСЬКИХ ТВАРИН ЯК ІНДИКАТОР СТАНУ ПРИРОДНИХ ЕКОСИСТЕМ У КОНТЕКСТІ АНТРОПОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Бусленко Л.В., Теплюк В.С.

Волинський національний університет імені Лесі Українки

пр. Воли, 13, 43025, м. Луцьк

lesybuslenko@gmail.com, tepluk.vadym@vnu.edu.ua

Стаття присвячена ролі мисливських тварин як індикаторів стану природних екосистем у контексті антропогенного навантаження. Метою роботи було оцінити біоіндикаційний потенціал мисливських тварин як індикаторів антропогенного забруднення природних екосистем на основі результатів польових екотоксикологічних досліджень. Дослідження проведено у мисливських угіддях Волинської області з включенням різних типів екосистем (лісові, агроландшафти, прибережні зони). Проаналізовано зразки тканин (печінка, нирки, м'язова тканина) відстріляних тварин із визначенням концентрацій Pb, Cd, Zn та Cu методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії. Статистичну обробку результатів здійснено з використанням параметричних критеріїв з оцінкою вірогідності відмінностей ($p < 0,05$). Встановлено статистично значуще підвищення концентрацій Pb і Cd у тканинах тварин, що мешкають в агроландшафтах, порівняно з лісовими екосистемами ($p < 0,05$). Найвищі рівні накопичення характерні для печінки та нирок, що перевищують відповідні показники м'язової тканини на 35–60%. Водночас концентрації Zn і Cu демонстрували відносну стабільність між групами, що свідчить про їхню фізіологічну регуляцію. Виявлено залежність рівня акумуляції металів від типу середовища існування та трофічних особливостей тварин. Вперше проведено комплексну порівняльну оцінку накопичення важких металів у тканинах диких копитних у різних типах екосистем із кількісним визначенням міжгрупових відмінностей та встановленням їх індикаторного значення. Отримані результати можуть бути використані для екологічного моніторингу мисливських угідь, оцінки безпечності мисливської продукції та обґрунтування заходів щодо зниження техногенного навантаження на природні екосистеми. *Ключові слова:* важкі метали, біоіндикація, дики копитні, екосистеми, екологічний моніторинг.

Biomonitoring of game animals as an indicator of the state of natural ecosystems in the context of anthropogenic pressure.
Buslenko L., Tepluk V.

This article examines the role of game animals as indicators of the state of natural ecosystems in the context of anthropogenic pressure. The aim of the study was to assess the bioindicator potential of game animals as indicators of anthropogenic pollution in natural ecosystems based on the results of field ecotoxicological studies. The study was conducted in hunting grounds in the Volyn region, encompassing various types of ecosystems (forests, agricultural landscapes, and riparian zones). Tissue samples (liver, kidneys, muscle tissue) from hunted animals were analyzed to determine the concentrations of Pb, Cd, Zn, and Cu using atomic absorption spectrophotometry. Statistical analysis of the results was performed using parametric tests with a significance level of $p < 0.05$. A statistically significant increase in Pb and Cd concentrations was found in animals inhabiting agricultural landscapes compared to forest ecosystems ($p < 0.05$). The highest accumulation levels were observed in the liver and kidneys, exceeding those in muscle tissue by 35–60%. In contrast, Zn and Cu concentrations showed relative stability between groups, indicating physiological regulation. A clear relationship between metal accumulation levels, habitat type, and trophic characteristics of animals was established. For the first time, a comprehensive comparative assessment of heavy metal accumulation in tissues of wild ungulates across different ecosystem types was conducted, with quantitative evaluation of intergroup differences and determination of their bioindicator significance. The obtained results can be used for environmental monitoring of hunting areas, assessment of game meat safety, and development of measures to reduce technogenic pressure on natural ecosystems. *Key words:* heavy metals, bioindication, wild ungulates, ecosystems, environmental monitoring.

Постановка проблеми. Сучасні екосистеми зазнають інтенсивного антропогенного впливу, що супроводжується накопиченням токсичних елементів у компонентах довкілля. Особливу небезпеку становлять важкі метали, які здатні акумулюватися у трофічних ланцюгах і впливати на біологічні системи різних рівнів організації. У зв'язку з цим виникає

потреба у розробці ефективних підходів до оцінки рівня забруднення природних екосистем [1–3].

Сучасні дослідження переконливо доводять можливість використання мисливських видів як біомоніторів хімічного забруднення. Показано, що концентрації кадмію, свинцю та інших важких металів у тканинах дикого кабана, зайця-русака та бла-



городного оленя відображають рівень техногенного навантаження і дозволяють чітко диференціювати природні, аграрні та урбанізовані ландшафти [4; 5].

Разом із тим антропогенний тиск на екосистеми не обмежується хімічним забрудненням. Інтенсивність мисливської діяльності, фрагментація середовищ існування, аграрна експансія та урбанізація призводять до змін просторової структури популяцій, вікового й статевого складу, а також поведінкових патернів диких тварин. Довготривалі спостереження свідчать, що навіть за відсутності вираженого токсикологічного навантаження мисливський пресинг і господарська трансформація ландшафтів здатні істотно змінювати угруповання ссавців, що має бути враховано у системі екологічної індикації [6; 7].

Незважаючи на зростання кількості публікацій, присвячених біомоніторингу мисливських тварин, залишається низка невирішених проблем. Більшість досліджень зосереджені на окремих індикаторах (переважно вмісті важких металів) без інтеграції їх з популяційними та просторовими показниками, що обмежує екосистемну інтерпретацію отриманих результатів [1–5]. Відсутня уніфікована система відбору біоматеріалу та оцінки індикаторних параметрів, що ускладнює порівняння даних між регіонами та різними типами угідь [5]. В Україні біомоніторинг мисливських тварин переважно використовується у межах мисливськогосподарських обліків і рідко розглядається як інструмент оцінки стану природних екосистем у контексті загального антропогенного навантаження [8–10].

Актуальність дослідження. Біомоніторинг мисливських тварин у сучасній літературі дедалі частіше використовується як спосіб оцінити не «наявність забруднювача», а фактичний біологічний наслідок антропогенного тиску на екосистему. Встановлено, що тканини мисливських видів акумулюють інтегровану інформацію про якість середовища, оскільки тварини контактують із ґрунтом, водою та кормами впродовж тривалого часу, а відтак відображають кумулятивну дію факторів [1; 2; 4]. З цієї точки зору сформувався домінуючий напрям останніх років – оцінювання важких металів і металоїдів як маркерів техногенного навантаження, що дозволяє порівнювати території з різним типом трансформації.

Показано, що *Sus scrofa* є одним із найінформативніших мисливських біомоніторів у зонах змішаного впливу агроландшафтів, урбанізації та локальних промислових джерел. Встановлено, що концентрації кадмію та свинцю в біоматеріалі кабана відображають територіальні відмінності рівнів забруднення і можуть слугувати індикатором екологічної якості середовища на регіональному рівні [1]. Уточнено, що індикаторна чутливість цього виду посилюється за рахунок омніворного типу живлення та активної взаємодії з ґрунтом, що підвищує ймовірність надходження металів через трофічний ланцюг. Окремо встановлено, що порівняння популяцій із урбанізо-

ваних і відносно «диких» територій дає можливість не лише фіксувати факт накопичення елементів, а й виділяти «профілі антропогенного впливу», які різняться за набором елементів і рівнем їх концентрацій [2] (рис. 1).

Індикаторна інформативність мисливських тварин має виражений видоспецифічний характер і змінюється залежно від типу антропогенного навантаження. *Sus scrofa* характеризується високою індикаторною чутливістю в урбанізованих та аграрно трансформованих ландшафтах, що зумовлено його омніворним типом живлення та активною взаємодією з ґрунтом [1; 2; 6]. *Cervus elaphus* відображає інтегральний стан лісових екосистем та чутливий до мисливського пресингу, що підтверджує доцільність мультивидового підходу до біомоніторингу [3; 4].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження виконано в межах екологічного моніторингу та оцінки екологічного стану мисливських угідь. Отримані результати спрямовані на вдосконалення підходів до біоіндикації техногенного забруднення та можуть бути використані у практиці природоохоронного управління.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Встановлено, що *Cervus elaphus* у дослідженнях останніх років розглядається не лише як біоіндикатор, а як елемент ширшої рамки One Health, де накопичення токсичних елементів у дикій фауні пов'язують із потенційним ризиком для людини через споживання продукції полювання та контакт із природним середовищем [4]. Показано, що така постановка питання зміщує акцент від опису концентрацій до оцінювання наслідків: які елементи, в яких тканинах і на яких територіях формують реалістичний профіль ризику. У цьому ж контексті встановлено, що розвиток біомоніторингу потребує методичних рішень, які знижують інвазивність відбору й одночасно зберігають достовірність. Показано, що неінвазивні підходи можуть бути застосовані для формування базових рівнів елементного складу та подальшого порівняння між територіями й періодами спостереження [5]. Припущено, що саме поєднання базових «фонів» і повторюваних схем відбору є ключем до переходу від разових вимірювань до справжнього моніторингу.

Паралельно із токсикологічним напрямом в останніх публікаціях посилився блок, де антропогенний тиск розуміють як комплекс, що включає не тільки забруднення, а й прямі мисливські дії. Показано, що довготривале картування слідів полювання виявляє складні просторово-часові патерни, які не зводяться до «високий/низький тиск», а залежать від доступності територій, сезонності та рівня контролю [6]. Встановлено, що присутність дослідницьких груп у природних районах може зменшувати тиск полювання та змінювати структуру угруповань ссавців, тобто людський фактор впливає на екосистему

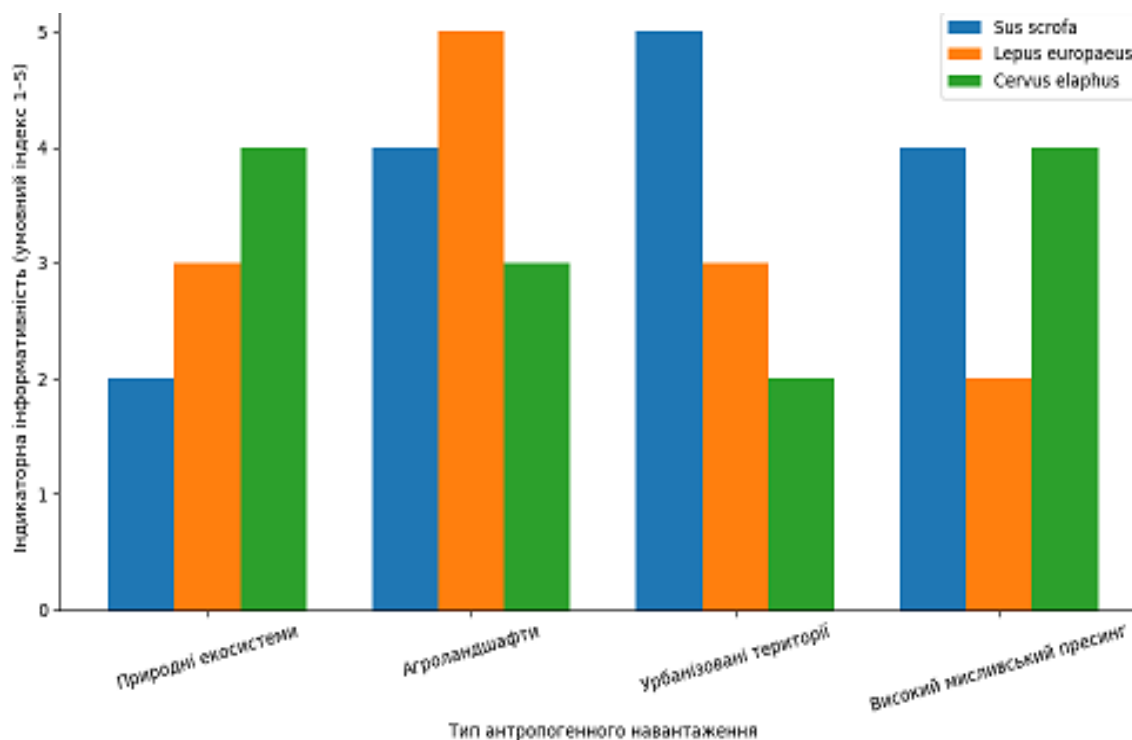


Рис. 1. Індикаторна інформативність мисливських тварин залежно від типу антропогенного навантаження
Джерело: сформовано авторами на основі [1–5]

навіть через механізми соціального контролю, а не лише через вилучення ресурсів [7]. Це важливо для інтерпретації біомоніторингу: однакові концентрації або однакова чисельність виду можуть формуватися різними траєкторіями впливу, якщо не враховувати характер антропогенного пресингу.

У національному контексті показано, що в Україні з'являються роботи, які безпосередньо трактують мисливських тварин як біоіндикаторів стану лісових біотопів та пропонують індикативну логіку оцінки середовищ існування [9]. Водночас встановлено, що методологічна база моніторингу довкілля частіше подається як загальна рамка без достатньої деталізації щодо індикаторних параметрів саме для мисливської фауни, що обмежує порівнюваність і практичну реалізацію результатів [8]. Показано, що відновлення популяцій мисливських тварин у лісових екосистемах тісно пов'язане з антропогенними трансформаціями, однак у значній частині оглядових матеріалів біомоніторинг як інструмент оцінки стану екосистеми поки що не систематизований як єдина методична схема [10]. Додаткові регіональні матеріали про природні умови й рідкісні види корисні як контекст, але потребують прив'язки до вимірюваних індикаторів, щоб працювати саме в логіці біомоніторингу [11].

Отже, показано, що сучасні дослідження забезпечили доказову базу для використання мисливських тварин як біомоніторів, передусім у частині важких

металів і металоїдів та їх просторових відмінностей [1; 3; 5]. Встановлено, що антропогенний тиск також проявляється через мисливську діяльність і здатен змінювати структуру угруповань, що необхідно враховувати під час екологічної інтерпретації [6; 7]. Водночас невирішеною залишається проблема інтеграції різних блоків індикаторів – токсикологічних, популяційно-структурних і просторово-поведінкових – у єдину модель оцінки стану екосистем для практичного застосування на рівні регіонів України. Саме ця прогалина обґрунтовує потребу в дослідженні, яке системно зіставляє індикаторні параметри та визначає умови їх коректного використання у контексті антропогенного навантаження [8–10].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Незважаючи на наявність значної кількості досліджень, присвячених накопиченню важких металів у біоті, питання порівняльної оцінки їх вмісту у тканинах диких тварин залежно від типу екосистеми залишається недостатньо вивченим. Зокрема, обмежено представлені дані щодо використання диких копитних як інтегральних біоіндикаторів у різних ландшафтно-екологічних умовах.

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває застосування біомоніторингових підходів, що передбачають використання мисливських тварин як індикаторів екологічного стану природних екосистем. Аналіз накопичення важких металів у тканинах

диких копитних дозволяє оцінити рівень антропогенного навантаження на лісові та агроландшафтні території. З огляду на це було проведено польові дослідження з відбором біологічних зразків мисливських тварин у природних екосистемах Поліського регіону України.

Мета – оцінити біоіндикаційний потенціал мисливських тварин як індикаторів антропогенного забруднення природних екосистем на основі результатів польових екотоксикологічних досліджень.

Наукова новизна. Вперше проведено комплексну порівняльну оцінку накопичення важких металів у тканинах диких копитних у різних типах екосистем із кількісним визначенням міжгрупових відмінностей та встановленням їх індикаторного значення.

Методологічне значення. Польові та лабораторні дослідження проводилися для визначення рівня накопичення важких металів у організмах мисливських тварин. Як біоіндикаторами стану природних екосистем за умов антропогенного навантаження. Дослідження виконувалося у 2022–2024 роках на території лісових та агроландшафтних екосистем Поліського регіону України (Волинська область).

Матеріалом дослідження слугували зразки біологічних тканин (печінка, нирки та м'язова тканина), відібрані від тварин, добутих під час офіційного мисливського сезону у мисливських господарствах досліджуваного регіону. Відбір зразків проводився безпосередньо після добування тварин із дотриманням вимог ветеринарно-санітарних норм. Зразки тканин відбирали стерильними інструментами, поміщали у герметичні поліетиленові контейнери та транспортували до лабораторії у охолодженому стані. До моменту аналізу матеріал зберігали при температурі -20°C .

У відібраних зразках визначали вміст основних екотоксикологічно значущих металів: кадмію (Cd), свинцю (Pb), цинку (Zn) та міді (Cu). Перед проведенням аналізу зразки тканин піддавали попередній підготовці, що включала висушування, гомогенізацію та мінералізацію у суміші концентрованих кислот. Отримані розчини використовували для подальшого визначення концентрацій металів.

Кількісний вміст важких металів визначали методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії з використанням стандартних методик екотоксикологічного аналізу. Для контролю точності вимірювань застосовували стандартні розчини елементів та проводили паралельні вимірювання зразків. Результати визначення концентрацій металів виражали у міліграмах на кілограм сухої маси тканини.

Для оцінки впливу антропогенного навантаження результати біомоніторингу аналізували з урахуванням типу екосистем, у межах яких були добути тварини. Виділяли три основні типи територій: лісові екосистеми, агроландшафти та приміські території, що відрізняються інтенсивністю господарського використання та рівнем техногенного впливу.

Отримані результати обробляли методами описової статистики. Для кожного показника визначали середні значення, стандартні відхилення та діапазон варіації. Статистичну обробку даних проводили з використанням t-критерію Стюдента для незалежних вибірок.

Викладення основного матеріалу. У ході польових досліджень було проаналізовано вміст важких металів у тканинах мисливських тварин (*Sus scrofa* та *Capreolus capreolus*), що мешкають у природних екосистемах Поліського регіону. Загалом було досліджено 48 зразків біологічних тканин (печінка, нирки, м'язова тканина), відібраних від тварин, добутих під час офіційного мисливського сезону на територіях з різним рівнем антропогенного навантаження.

Отримані результати свідчать про відмінності у рівнях біоаккумуляції важких металів залежно від виду тварин та типу тканини. Найбільші концентрації кадмію та свинцю спостерігалися у печінці та нирках, що пов'язано з функціональною роллю цих органів у процесах детоксикації та накопичення ксенобіотиків. У м'язовій тканині концентрації досліджуваних металів були значно нижчими.

Також встановлено, що у тканинах *Sus scrofa* вміст важких металів у середньому був вищим порівняно з *Capreolus capreolus*. Це може бути зумовлено особливостями живлення кабанів, які активно використовують ґрунтовий корм та безхребетних, що підвищує ймовірність надходження токсичних елементів до організму.

У результаті лабораторного аналізу біологічних зразків було визначено концентрації основних екотоксикологічно значущих металів у тканинах мисливських тварин. Оцінку біоаккумуляції проводили у печінці, нирках та м'язовій тканині *Sus scrofa* та *Capreolus capreolus* (табл. 1).

Порівняльний аналіз показав, що у тканинах *Sus scrofa* концентрації токсичних металів були статистично вищими порівняно з *Capreolus capreolus*. Так, вміст кадмію у печінці *Sus scrofa* перевищував відповідний показник у *Capreolus capreolus* приблизно на 35 % ($p < 0,05$), а у нирках – на 32 % ($p < 0,05$). Концентрація свинцю у печінці дикого кабана була більшою приблизно на 40 % ($p < 0,05$), тоді як у нирках різниця становила близько 38 % ($p < 0,05$). У м'язовій тканині також спостерігалася підвищення рівня Cd та Pb у *Sus scrofa* відповідно на 27 % та 37 %, однак для біогенних елементів – цинку та міді – відмінності між видами були менш вираженими і не досягали статистичної значущості ($p > 0,05$). Виявлені закономірності можуть бути пов'язані з особливостями трофічної поведінки видів та більш інтенсивним контактом дикого кабана з ґрунтовими субстратами під час пошуку корму.

З метою оцінки впливу антропогенного навантаження на процеси біоаккумуляції важких металів було проведено порівняльний аналіз концентрацій досліджуваних елементів у тканинах мисливських

Таблиця 1

Вміст важких металів у тканинах мисливських тварин Поліського регіону (мг/кг сухої маси, $M \pm m$)

Метал	<i>Sus scrofa</i> печінка (n=8)	<i>Sus scrofa</i> нирки (n=8)	<i>Sus scrofa</i> м'язи (n=8)	<i>Capreolus</i> <i>capreolus</i> печінка (n=8)	<i>Capreolus</i> <i>capreolus</i> нирки (n=8)	<i>Capreolus</i> <i>capreolus</i> м'язи (n=8)	p
Cd	0,42±0,05	0,78±0,07	0,11±0,02	0,31±0,04	0,59±0,06	0,08±0,01	<0,05
Pb	0,67 ± 0,09	0,54 ± 0,06	0,22 ± 0,03	0,48 ± 0,07	0,39 ± 0,05	0,16 ± 0,02	<0,05
Zn	28,3 ± 2,4	25,6 ± 2,1	22,4 ± 1,9	26,7 ± 2,2	23,9 ± 1,8	21,1 ± 1,6	>0,05
Cu	7,4 ± 0,8	5,9 ± 0,7	3,2 ± 0,4	6,1 ± 0,7	4,8 ± 0,5	2,7 ± 0,3	>0,05

Примітка: p – рівень статистичної значущості різниць між відповідними тканинами *Sus scrofa* та *Capreolus capreolus*.
Джерело: сформовано авторами

Таблиця 2

Вміст важких металів у тканинах мисливських тварин залежно від типу екосистеми (мг/кг сухої маси, $M \pm m$)

Метал	Лісові екосистеми (n=18)	Агроландшафти (n=16)	Приміські території (n=14)	p
Cd	0,29 ± 0,04	0,41 ± 0,05	0,56 ± 0,07	<0,05
Pb	0,38 ± 0,05	0,57 ± 0,06	0,71 ± 0,08	<0,05
Zn	24,8 ± 2,1	26,3 ± 2,3	27,5 ± 2,4	>0,05
Cu	5,6 ± 0,6	6,2 ± 0,7	6,9 ± 0,8	>0,05

Примітка: p – рівень статистичної значущості різниць між лісовими, агроландшафтними та приміськими екосистемами.
Джерело: сформовано авторами

тварин залежно від типу екосистеми. Для цього всі відібрані зразки було згруповано відповідно до територій походження тварин: лісові екосистеми, агроландшафти та приміські території, що характеризуються різним рівнем господарського освоєння та техногенного впливу.

Такий підхід дозволяє оцінити просторові особливості розподілу важких металів у природних екосистемах та встановити можливий зв'язок між рівнем антропогенного навантаження і ступенем їх накопичення у біологічних тканинах тварин. Середні концентрації кадмію, свинцю, цинку та міді у досліджених зразках залежно від типу екосистеми наведено у таблиці 2.

Порівняльний аналіз концентрацій важких металів у тканинах мисливських тварин залежно від типу екосистеми показав наявність чіткої тенденції до зростання рівнів токсичних елементів у напрямку від природних лісових територій до більш трансформованих ландшафтів. Зокрема, вміст кадмію у зразках, відібраних у агроландшафтах, був у середньому на 41 % вищим, ніж у лісових екосистемах ($p < 0,05$), тоді як у приміських територіях цей показник перевищував лісові значення приблизно на 93 % ($p < 0,05$). Аналогічна закономірність простежувалася і для свинцю: у агроландшафтних територіях його концентрація була більшою на 50 %, а у приміських зонах – майже на 87 % порівняно з лісовими екосистемами ($p < 0,05$).

Для біогенних елементів (цинку та міді) спостерігалася менш виражена варіабельність концентра-

цій між досліджуваними типами територій. Зокрема, вміст Zn у агроландшафтах перевищував лісові показники приблизно на 6 %, а у приміських територіях – на 11 %, тоді як для Cu відповідні відмінності становили близько 11 % та 23 %. Однак зазначені відмінності не досягали статистичної значущості ($p > 0,05$). Отримані результати свідчать про те, що саме токсичні елементи, зокрема кадмій і свинець, найбільш чутливо реагують на зростання антропогенного навантаження, що підтверджує їхню роль як індикаторів техногенного впливу на природні екосистеми.

Порівняльний аналіз показав, що найнижчі концентрації кадмію та свинцю фіксувалися у тварин, добутих у лісових екосистемах, де рівень антропогенного впливу є відносно невисоким. У агроландшафтних та приміських територіях спостерігалася статистично значуще підвищення концентрацій цих металів ($p < 0,05$). Це може бути пов'язано з впливом сільськогосподарської діяльності, використанням мінеральних добрив, транспортним навантаженням та іншими техногенними факторами.

Показано, що найбільш інформативними для біомоніторингу є печінка та нирки, у яких концентрації кадмію та свинцю значно перевищують рівні, зафіксовані в м'язовій тканині, що пов'язано з особливостями метаболізму та детоксикаційної функції цих органів.

Встановлено, що мисливські тварини демонструють видоспецифічні та органоспецифічні особливості накопичення важких металів, які безпо-

середньо відображають характер і інтенсивність антропогенного навантаження [1; 2; 4]. Показано, що омніворні копитні, зокрема *Sus scrofa*, є найбільш інформативними біомоніторами для регіонів із комбінованим впливом аграрної діяльності та урбанізації. Встановлено, що включення даних неінвазивного відбору розширює можливості довготривалого моніторингу та формування фонових рівнів елементного складу [9; 10; 12].

Біомоніторинг мисливських тварин дозволяє оцінювати стан природних екосистем не за окремими параметрами, а через інтегральну біологічну відповідь організмів на антропогенне навантаження. Показано, що індикаторна інформативність мисливських видів формується під впливом сукупності чинників, серед яких визначальними є тип живлення, просторове використання середовища, рівень контакту з ґрунтом і тривалість експозиції до антропогенних факторів. Саме ці особливості зумовлюють видоспецифічні відмінності у характері та масштабах накопичення полутантів і визначають можливості використання окремих видів як біоіндикаторів.

Найбільш чутливими до комбінованого антропогенного впливу в аграрно-урбанізованих ландшафтах є омніворні копитні, тоді як травоядні та дрібні мисливські види доцільні для оцінки локальних і регіональних змін екосистем. Найвищу інформативність для біомоніторингу забезпечують показники, отримані з органів детоксикації, що підтверджує їх пріоритетність у системі екологічного контролю. Інтеграція токсикологічних, популяційно-структурних і просторово-поведінкових показників є необхідною умовою формування науково обґрунтованої системи біомоніторингу мисливських тварин у контексті антропогенного навантаження.

Отримані результати свідчать про чітку залежність рівня накопичення важких металів у тканинах диких копитних від типу екосистеми. Встановлено достовірне підвищення концентрацій Pb і Cd у тварин, що мешкають в агроландшафтах, узгоджується з даними сучасних досліджень, у яких підкреслюється роль сільськогосподарської діяльності як одного з ключових джерел техногенного навантаження на довкілля [1; 2]. Зокрема, внесення мінеральних добрив, використання пестицидів та близькість до транспортної інфраструктури формують додаткові джерела надходження токсичних елементів у трофічні ланцюги.

Виявлена органоспецифічність акумуляції важких металів, з максимальними концентраціями у печінці та нирках, повністю відповідає відомим фізіологічним механізмам детоксикації та біотрансформації ксенобіотиків [3; 4]. Підвищення вмісту металів у цих органах на 35–60% порівняно з м'язовою тканиною підтверджує їхню роль як основних депо накопичення токсикантів. Подібні закономірності неодноразово описані в роботах, присвячених

біомоніторингу мисливських тварин у Європі та Україні, де печінка і нирки розглядаються як найбільш інформативні біосубстрати для оцінки екологічного стану територій [5; 6].

Водночас відсутність достовірних міжгрупових відмінностей для есенціальних мікроелементів (Zn і Cu) свідчить про існування ефективних механізмів гомеостатичної регуляції їх вмісту в організмі тварин [7]. Це узгоджується з результатами інших досліджень, у яких показано, що концентрації біогенних елементів менш чутливі до змін середовища порівняно з токсичними металами, оскільки підтримуються на відносно стабільному рівні за рахунок фізіологічних адаптацій [8].

Отримані дані також підтверджують значущість диких копитних як інтегральних біоіндикаторів стану довкілля. На відміну від точкових вимірювань у ґрунті або воді, аналіз тканин тварин дозволяє оцінити кумулятивний ефект надходження забруднювачів через харчові ланцюги, що є більш інформативним для екологічного моніторингу [9]. Зокрема, *Sus scrofa* завдяки своїй всеїдності та активному контакту з ґрунтом демонструє підвищену чутливість до забруднення, тоді як *Capreolus capreolus* відображає переважно стан рослинного компоненту екосистеми [10].

Таким чином, отримані результати вказують на те, що мисливські тварини можуть ефективно використовуватися як біоіндикатори екологічного стану природних екосистем. Виявлені особливості накопичення важких металів відображають фізіологічні механізми їх біоаккумуляції у організмах тварин, вплив антропогенних факторів на формування хімічного складу природного середовища.

Головні висновки. Встановлено, що рівень накопичення важких металів у тканинах диких копитних достовірно залежить від типу екосистеми. У тварин, що мешкають в агроландшафтах, концентрації Pb і Cd статистично значуще перевищують відповідні показники у лісових екосистемах ($p < 0,05$), що свідчить про вищий рівень техногенного навантаження в цих умовах.

Виявлено органоспецифічні особливості акумуляції. Максимальні концентрації важких металів зафіксовані у печінці та нирках, які перевищують показники м'язової тканини на 35–60%. Це підтверджує роль цих органів як основних депо токсичних елементів та найбільш інформативних об'єктів біомоніторингу.

Показано, що концентрації есенціальних елементів (Zn і Cu) не демонструють достовірних міжгрупових відмінностей ($p > 0,05$), що свідчить про ефективні механізми фізіологічної регуляції їх вмісту та обмежену чутливість до екологічних змін порівняно з токсичними металами.

Отримані результати підтверджують доцільність використання тканин диких тварин у системах екологічного моніторингу та можуть бути застосовані

для оцінки безпечності мисливської продукції та обґрунтування природоохоронних заходів.

Перспективи використання результатів дослідження. Перспективи використання результатів дослідження полягають у впровадженні отри-

маних даних у системи екологічного моніторингу, розробці регіональних програм оцінки якості довкілля, а також у подальших дослідженнях динаміки накопичення токсичних елементів у трофічних ланцюгах.

Література

1. Cokoski K., Beuković D., Maletić V., Polovinski Horvatić M., Vukadinović M., Dimitrieska Stojković E., Enimiteva V. Wild Boar (*Sus scrofa* L.) as the biomonitor of cadmium and lead pollution in the Republic of North Macedonia. *South-east European forestry: SEEFOR*. 2023. Vol. 14(2). P. 235–243.
2. Cammilleri G., Messina E. M. D., Pantano L., Buscemi M. D., Migliore S., Blanda V., Galluzzo F. G., Alfano C., Riolo P., Lo Dico G. M., Ferrantelli V. Trace metals and metalloids in wild boars (*S. scrofa*) from Southern Italy: comparison between urban and wild areas. *Chemosphere*. 2025. Vol. 380. P. 144473. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144473>
3. Can S. Ü., Demirbaş Y., Erduran N., Beuković D. The European hare (*Lepus europaeus*) as a biomonitor of selected heavy metal pollution in the Marmara region, Türkiye. *Contemporary Agriculture*. 2025. Vol. 74(1-2). P. 35–44.
4. Jota Baptista C., Seixas F., Gonzalo-Orden J. M., Patinha C., Pato P., Ferreira da Silva E., Fernandes G., Oliveira P. A. Heavy metal and metalloid concentrations in red deer (*Cervus elaphus*) and their human health implications from One Health perspective. *Environ Geochem Health*. 2024. Vol. 46(7). P. 226. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10653-024-01991-8>
5. Andersson Stavridis M., Pollestad B. M., Veiberg V., Mikkelsen Ø., Ciesielski T. M., Jenssen B. M. Toxic metals and other elements in Svalbard reindeer: Establishing baselines and assessing non-invasive sampling for biomonitoring. *Sci Total Environ*. 2025. Vol. 961. P. 178226. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.178226>
6. Nguimdo V. R. V., Abwe E. E., Morgan B. J., Ketchen M. E., Mfossa D. M., Abwe A. E., ... Soofi M. Long-Term Monitoring of Hunting Signs Reveals Complex Spatiotemporal Patterns of Hunting Activities в Unprotected African Rainforest. *Diversity and Distributions*. 2025. Vol. 3(1). P. e13951.
7. Balduccio N., Bessone M., Iannarilli F., Rovero F., Fruth B. Long-term research presence mitigates hunting pressure and shapes mammal communities in the Congo Basin. *Biological Conservation*. 2025. Vol. 312. P. 111502.
8. Лукашов Д. В. Моніторинг довкілля. Навчальний посібник. Київ, 2022. 193 с.
9. Razanov S. F., Matusiak MV B. A., Razanova AM K. M. The bioindicative role of game animals in monitoring the condition of forest habitats in Vinnytsia region. *Сільське господарство та лісівництво*. № 2(37). С. 205–218. DOI: <https://doi.org/10.37128/2707-5826-2025-2-18>
10. Левандовська С. М., Хрик В. М., Ситник О. С. Інноваційні підходи до відновлення популяцій мисливських тварин у лісових екосистемах: огляд. *«Агробіологія»*. 2025. № 1. С. 322–330. DOI: <https://doi.org/10.33245/2310-9270-2025-195-1-322-330>
11. Заповідна Житомирщина: рідкісні види та природні особливості їхнього існування: Збірка інформаційних матеріалів. URL: <https://sd4ua.org/wpcontent/uploads/2023/03/ukrayinskoyu-6.pdf>
12. Новицький Р. О. Мисливствознавство: методичні вказівки для студентів біологічних спеціальностей університету. Київ: ДНУ ім. Олеся Гончара, 2009. 30 с.

Дата першого надходження статті до видання: 26.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ КОМФОРТНОСТІ КЛІМАТУ ЗА БІОКЛІМАТИЧНИМ ІНДЕКСОМ В. Г. БОКШІ У ЛУЦЬКУ ТА СВІТЯЗІ

Федонюк В.В.¹, Павлюк М.М.²

¹Луцький національний технічний університет
вул. Львівська, 75, 43018, м. Луцьк

²Комунальна установа «Волинська обласна Мала академія наук»
вул. В'ячеслава Чорновола, 3, 43024, м. Луцьк
ecolutsk@gmail.com, margaritapavluk88@gmail.com

У дослідженні проаналізовано динаміку комфортності кліматичних показників протягом року за зміною біокліматичного індексу В. Г. Бокші та його складових у Луцьку та Світязі (на прикладі 2021 р.) для оцінки регіональної сприятливості погодно-кліматичних умов для людини. Актуальність даного дослідження визначається підвищенням інтересом до впливу погодних умов, зміни метеорологічних величин (температури, тиску, вологості тощо) на стан здоров'я людей у зв'язку з глобальними змінами клімату нашої планети та зростанням числа проявів метеочутливості і метеозалежності. Біокліматичні індекси (далі – БКІ) – це показники, що дозволяють кількісно оцінити такий вплив та його прояви.

На основі даних наукової літератури та відкритих джерел проаналізовано вивченість питань, які досліджувалися: поняття біоклімату та біокліматичних індексів, їх класифікація та призначення. Розглянуто методологію та результати статистично-графічного аналізу біокліматичного індексу патогенності $I_{\text{сумар}}$, запропонованого В. Бокшею, та його складових у Луцьку та Світязі протягом 2021 р. Збудовано ряд графіків та діаграм, визначено періоди та тривалість періодів з сприятливими і несприятливими значеннями індексу. Проведено порівняння значень біокліматичного індексу патогенності $I_{\text{сумар}}$ для Луцька і Світязя, погодно-кліматичні умови яких мають певні відмінності: у Луцьку проявляється пом'якшувачий вплив великого міста на мікроклімат, а у Світязі мікроклімат визначається лише природними чинниками та передумовами. Порівняльний аналіз динаміки індексу патогенності В.Г. Бокші для Луцька та Світязя дозволяє зробити кілька висновків: середні місячні значення індексу $I_{\text{сумар}}$ у Луцьку та Світязі коливаються у схожих межах, демонструючи велику динаміку патогенності протягом року. Однак у Світязі середні значення патогенності є дещо вищими. Динаміка за сезонами: обидві станції виявляють подібні тенденції, найвищі показники індексу патогенності відзначаються в холодний період року. Важливою різницею є те, що у Світязі абсолютні значення всіх проміжних індексів теж є вищими. Обидва населених пункти мають сприятливі кліматичні умови (40-45 % днів року характеризуються оптимальними значеннями $I_{\text{сумар}}$, і лише близько 0,6 % днів року мають гострі значення $I_{\text{сумар}}$). Високі показники комфортності свідчать про сприятливість кліматичних умов для господарської, рекреаційної, туристичної діяльності. *Ключові слова:* Луцьк, Світязь, біокліматичний індекс, індекс патогенності В.Г. Бокші, біоклімат.

Comparative analysis of climate comfort according to the V.G. Boksha bioclimatic index in Lutsk and Svityaz. Fedoniuk V., Pavlyuk M.

The study analyzed the dynamics of comfort of climatic indicators during the year according to the change in the V. G. Boksha bioclimatic index and its components in Lutsk and Svityaz (using the example of 2021) to assess the regional favorability of weather and climatic conditions for humans. The relevance of this study is determined by the increased interest in the impact of weather conditions, changes in meteorological variables (temperature, pressure, humidity, etc.) on the health of people due to global climate changes on our planet and the increase in the number of manifestations of meteosensitivity and meteodependence. Bioclimatic indices (hereinafter referred to as BCI) are indicators that allow quantitatively assessing such an impact and its manifestations.

Based on data from scientific literature and open sources, the level of study of the issues under study was analyzed: the concept of bioclimate and bioclimatic indices, their classification and purpose. The methodology and results of the statistical and graphical analysis of the bioclimatic pathogenicity index I_{sumar} , proposed by V. G. Boksha, and its components in Lutsk and Svityaz during 2021 were considered. A number of graphs and diagrams were constructed, and the periods and duration of periods with favorable and unfavorable index values were determined. The values of the bioclimatic pathogenicity index I_{sumar} were compared for Lutsk and Svityaz, whose weather and climatic conditions have certain differences: in Lutsk, the mitigating influence of a large city on the microclimate is manifested, and in Svityaz the microclimate is determined only by natural factors and prerequisites. A comparative analysis of the dynamics of the pathogenicity index of V. G. Boksha for Lutsk and Svityaz allows us to draw several conclusions: the average monthly values of the I_{sumar} index in Lutsk and Svityaz fluctuate within similar limits, demonstrating a large dynamics of pathogenicity during the year. However, in Svityaz, the average pathogenicity values are somewhat higher. Seasonal dynamics: both stations show similar trends, the highest pathogenicity index values are observed in the cold period of the year. An important difference is that in Svityaz, the absolute values of all intermediate indices are also higher. Both settlements have favorable climatic conditions (40-45% of the days of the year are characterized by optimal I_{sumar} values, and only about 0.6% of the days of the year have acute I_{sumar} values). High comfort indicators indicate the favorable climatic conditions for economic, recreational, and tourist activities. *Key words:* Lutsk, Svityaz, bioclimatic index, pathogenicity index of V.G. Boksha, bioclimate.



Постановка проблеми. У роботі здійснено аналіз та порівняння річної динаміки окремих біокліматичних показників в Луцьку і Світязі, на основі чого проведена оцінка сприятливості погодно-кліматичних умов для людини в даних населених пунктах та її динаміки в умовах змін клімату.

Актуальність дослідження. Актуальність роботи визначається підвищеним інтересом до впливу погодних умов, зміни метеорологічних величин (температури, тиску, вологості тощо) на стан здоров'я людей у зв'язку з глобальними змінами клімату нашої планети та зростанням числа проявів метеочутливості і метеозалежності. Біокліматичні індекси (далі – БКІ) – це показники, які дозволяють кількісно оцінити такий вплив та його прояви.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та науково-практичними завданнями. Вивчення динаміки комфортності кліматичних умов із використанням біокліматичних індексів – це важливе завдання у галузі медичної кліматології, вирішення якого дозволить знайти нові підходи і розробити рекомендації для подолання або зменшення проявів метеочутливості та метеопатій. БКІ є індикаторами медико-кліматичних оптимумів та песимумів, які прямо пов'язані з самопочуттям та метеочутливістю людини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останні десятиліття докладно вивчаються причини метеочутливості та метропатій із використанням сучасних наукових підходів. Для оцінки показників впливу погоди та клімату на людину було запропоновано також поняття біоклімату. Питанням аналізу комфортності погодних умов для людини, біоклімату та його параметрів, методів їх оцінки присвячені праці Бойко І.Д., Савранчук Л.А., Бокші В.Г., Богуцького Б.В., Врублевської О.О., Малицької Л.В., Катеруши Г.П., Григор'єва Л. І., Томіліна Ю.А., Огородника А.М., Даценко І. І., Габовича Р. Д., Польового А.І., Шалімова М. О. та багатьох інших авторів [2, 3, 4, 5, 7, 10]. Зокрема, у працях Малицької Л.В., Балабух В.О., Шевченко О.Г., Сніжко С.І., Матвієнко М.О., Грабко Н.В. Полетаєвої Л.М.; Федченко О.В., Катеруши Г.П., Пилипак О.В., Швець Л.П., Захаркевич Н.П., Польового А.І. дається класифікація та порівняльна оцінка біокліматичних індексів, проводиться застосування їх для аналізу комфортності погоди в різних регіонах України, у тому числі – Українського Полісся [5, 7, 10]. За кордоном питання використання біокліматичних індексів та оцінки комфортності погоди досліджувалися у працях Contor N., Unger J., Kalkstein L. S., Lee H., Holst J., Mayer H., Matzarakis A., Amelung B., Steadman R. G. [11, 12].

Проте, для території Волинської області є потреба в дослідженнях такого напрямку, оскільки існуючі наукові роботи були переважно поодинокими і дослідження комфортності кліматичних умов в умовах наростання регіональних проявів кліматичних змін

лише розпочаті у працях Федонюк В.В., Роїк І.О., Федонюка М.А., Павлюк М.М., Мирки В.В., Іванців В.В., Вовка О.П., Жадько О.А., Фесюка В.О. та інших авторів [6, 8, 9, 12, 13, 14, 15].

Виділення не виділених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Метою роботи є аналіз та порівняння річної динаміки окремих біокліматичних показників в Луцьку і Світязі, на основі цього – оцінка сприятливості погодно-кліматичних умов для людини. Такий аналіз не проводився раніше для даних населених пунктів, а його результати дозволять скласти уявлення про просторово-часові відмінності показників комфортності і проявів змін клімату в межах регіону. В перспективі оцінку комфортності клімату доцільно провести для більшої кількості населених пунктів або і для всієї території України [6, 14, 15].

Новизна. Новизна дослідження пов'язана з тим, що порівняльна оцінка комфортності клімату для Луцька та Світязя на основі застосування БКІ В.Г. Бокші проводиться вперше.

Методологічне або загальнонаукове значення. Загальний (або сумарний) індекс патогенності $I_{\text{сумар}}$ В.Г. Бокші, який відображає комплексно метеорологічні умови певного періоду, геліо- і геофізичні чинники, визначається як сума ряду додатків, кожен з яких розраховується за окремим метеорологічним показником (зміна температури, відносної вологості повітря, швидкості вітру, хмарності; враховується також міждобова мінливість (перепад) температури повітря та атмосферного тиску). Методика розрахунку індексу представлена у [3, 12]. Індекс патогенності В.Г. Бокші визначається за наступною формулою, у балах:

$$I_{\text{сумар}} = it + if + iv + in + i\Delta t + i\Delta p \text{ (бали)}$$

Величини it , if , iv , in , $i\Delta t$, $i\Delta p$ – це складові сумарного індексу, або індекси патогенності за окремими метеофакторами: 1) індекс патогенності температури повітря: $it = 0,02(18 - t)^2$ при $t \leq 18^\circ\text{C}$, $it = 0,2(t - 18)^2$ при $t > 18^\circ\text{C}$;

2) індекс патогенності вологості $if = (f - 70)/2$;

3) індекс патогенності вітру $iv = 0,2v^2$;

4) індекс патогенності хмарності $in = 0,06n^2$, де $n = 10 - (10 \cdot S_{\phi}/S_m)$;

5) індекс патогенності зміни температури повітря $i\Delta t = 0,3\Delta t^2$; 6) індекс патогенності зміни атмосферного тиску $i\Delta p = 0,06\Delta p^2$.

При відсутності на метеостанції актинометричних спостережень, i , відповідно, можливостей визначення параметрів інсоляції S_{ϕ} та S_m доданок in не розраховується та не включається до сумарного індексу.

Показники індексу прийнято вважати оптимальними, якщо він становить менше 9 балів, подразнюючими при 10 – 29 і гострими при $I_{\text{сумар}} = 30$ та більше.

Розрахунки індексу патогенності проведено на основі щоденних даних 2021 р. по ст. Луцьк і Світязь та їх статистичної обробки, здійсненої у програмі Excel за стандартними методиками статистичного аналізу даних. 2021 рік був вибраний як такий, що має повний метеоархів у відкритій базі даних [1]. Використано показники середніх добових значень температури повітря, відносної вологості, швидкості вітру та атмосферного тиску. Попередньо було розраховано також міждобову мінливість температури і тиску. Вибір для порівняльного аналізу ст. Луцьк та Світязь був обумовлений тим, що серед шести метеостанцій Волинської області ці дві станції мають найбільші відмінності у розміщенні та природних умовах: Луцьк – станція, що розміщена в приміській зоні, це міська, урбанізована територія, південь нашої області; Світязь – станція розміщена у селі, на березі озера Світязь, в межах ландшафту, наближеного до природного, впливу великого міста немає, розміщення станції більш північне. Попередньо ми також припускали, що особливий вплив мікроклімату озера Світязь проявиться при аналізі біокліматичних індексів.

Виклад основного матеріалу. Аналіз результатів проведених розрахунків та їх графічного представлення показує, що сумарний біокліматичний індекс патогенності $I_{\text{сумар}}$ та його проміжні показники мають чітко виражену річну динаміку. Найвищі значення індексу i , відповідно, найбільш патогенні погодні-кліматичні умови зафіксовані для холодного періоду року (листопад – березень), з максимальними значеннями $I_{\text{сумар}}$ у лютому. Оптимальних

значень індекс набуває в літні місяці, з мінімальними значеннями $I_{\text{сумар}}$ у червні, а у квітні-травні та вересні – жовтні значення показника набуває проміжних значень, в окремі дні – вони оптимальні, в інші дні цих місяців – подразнюючі. Середні місячні показники $I_{\text{сумар}}$ не набувають гострих значень. Протягом 2021 року спостерігалось 21 днів в Луцьку та 23 дні у Світязі з гострими значеннями $I_{\text{сумар}}$ (рис. 1 та табл. 1).

В цілому погодні-кліматичні умови 2021 р. можна охарактеризувати як сприятливі для людини. Порівняння динаміки $I_{\text{сумар}}$ для Луцька та Світязя по місяцях року представлено на графіках (рис. 2). Аналіз результатів свідчить про вищу патогенність клімату у Світязі в порівнянні з Луцьком: середні місячні значення $I_{\text{сумар}}$ є вищими для Світязя протягом року для кожного місяця.

За показником числа днів з оптимальними значеннями індексу більшість місяців року (квітень – листопад) є сприятливішими у Луцьку (оптимальних днів більше), а місяці з грудня по березень – мають практично однакові показники числа оптимальних днів для обох станцій. За показником числа днів протягом місяця з подразнюючими значеннями індексу різниця між показниками Луцька та Світязя невелика, вона коливається в межах 0 – 5 днів. Більш сприятливими, з меншим числом подразнюючих днів у Луцьку є січень, лютий, квітень, липень, серпень, вересень, жовтень і листопад, а у Світязі сприятливішими є березень, травень, грудень. В червні показники однакові.

За показником числа днів протягом місяця з гострими значеннями індексу патогенності стан-

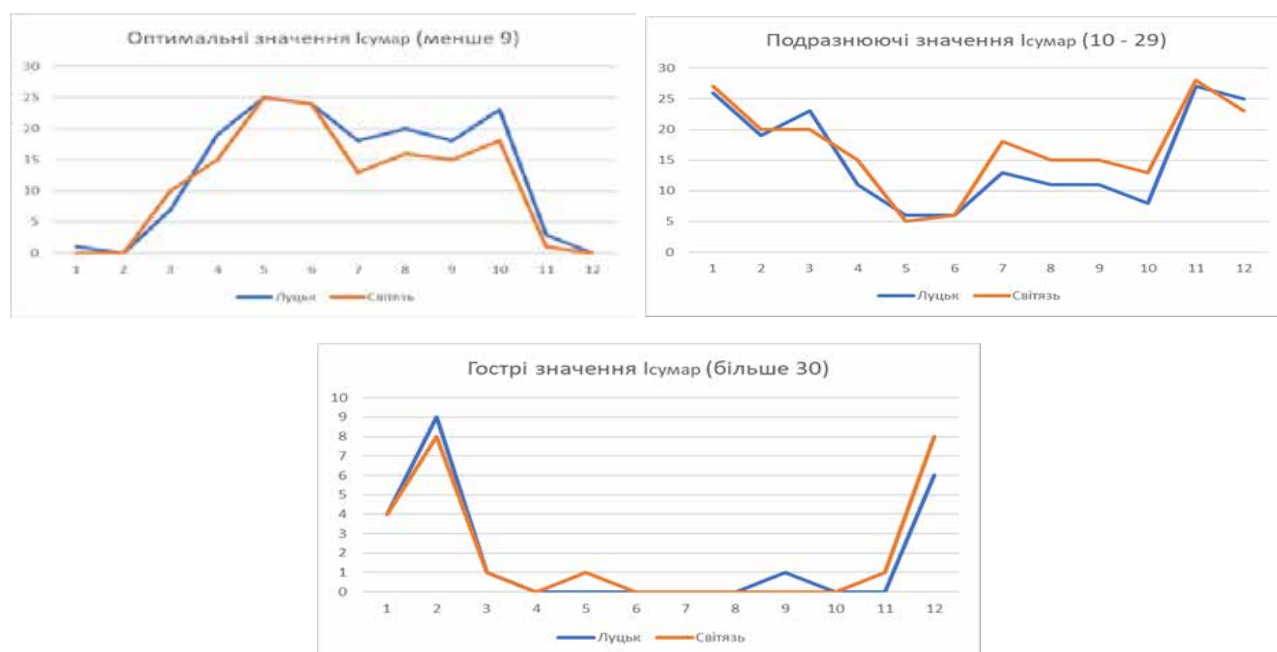


Рис. 1. Порівняння місячної кількості днів з оптимальним, подразнюючим та гострим значенням $I_{\text{сумар}}$ у Луцьку та Світязі у 2021 р.

Таблиця 1

Порівняння значень сумарного індексу $I_{\text{сумар}}$ В. Бокші для Луцька та Світязя

Місяць	Сумарний індекс $I_{\text{сумар}}$ - Луцьк, кількість днів			Сумарний індекс $I_{\text{сумар}}$ - Світязь, кількість днів		
	Оптимальний (менше 9)	Подразнюючий (10-29)	Гострий (більше 30)	Оптимальний (менше 9)	Подразнюючий (10-29)	Гострий (більше 30)
Січень	1	26	4	0	27	4
Лютий	0	19	9	0	20	8
Березень	7	23	1	10	20	1
Квітень	19	11	0	15	15	0
Травень	25	6	0	25	5	1
Червень	24	6	0	24	6	0
Липень	18	13	0	13	18	0
Серпень	20	11	0	16	15	0
Вересень	18	11	1	15	15	0
Жовтень	23	8	0	18	13	0
Листопад	3	27	0	1	28	1
Грудень	0	25	6	0	23	8
Сума днів, рік	158	186	21	137	205	23

Рис. 2. Порівняння динаміки середніх місячних значень $I_{\text{сумар}}$ у Луцьку та Світязі у 2021 р.

ції майже не відрізняються. Місяцями з найбільшою кількістю гострих днів є лютий та грудень і в Луцьку, і у Світязі. Місячне число днів з гострими значеннями індексу може відрізнятися не більше як на 1-2 дні.

Отже, порівняльний аналіз динаміки індексу патогенності В.Г. Бокші для Луцька та Світязя дозволяє зробити кілька важливих висновків: середні місячні значення індексу $I_{\text{сумар}}$ у Луцьку та Світязі коливаються у схожих межах, демонструючи велику динаміку патогенності протягом року. Однак у Світязі середні значення патогенності є дещо вищими. Динаміка за сезонами показує, що обидві станції виявляють подібні тенденції, найвищі показники індексу патогенності відзначаються в холодний період року. Важливою різницею є те, що у Світязі абсолютні значення показників є вищими.

На рис. 3 представлено порівняльні графіки річної динаміки проміжних індексів, які є складовими сумарного БКІ В.Г. Бокші. Аналіз їх динаміки показує, що параметри температурного режиму (i_t , Δt) набувають оптимальних значень у теплий період року, проте в другій половині літа їх вплив на людину є подразнюючим, через значне підвищення температур і проходження «хвиль спеки». Проміжний індекс вологості i_v оптимальних значень набуває у період з квітня по серпень, в інші місяці року його значення загострюються. Проміжний індекс швидкості вітру i_v оптимальних значень набуває у червні – серпні, а найгострішими його значення є у зимові місяці та у травні. Проміжний індекс, який розраховується на основі показників атмосферного тиску (Δp), оптимальних значень набуває у період з квітня по вересень.



Рис. 3. Порівняння динаміки середніх місячних значень проміжних індексів i_p , i_r , i_v , Δp та Δt у Луцьку та Світязі

Дні з гострою патогенністю: обидві станції фіксують декілька днів (близько 20) з гострою патогенністю протягом року. У Світязі це число трошки вище (23 дні, при 21 для Луцька), що може вказувати на більший вплив патогенних факторів.

Комфортність клімату: в обох випадках комфортність клімату оцінюється як висока. Луцьк та Світязь в цілому мають сприятливі умови для життя та забезпечують досить високий рівень комфортності погодно-кліматичних умов.

Загальною тенденцією є те, що обидва населених пункти мають сприятливі кліматичні умови (40–45 % днів року характеризуються оптимальними значеннями $I_{\text{сумар}}$, лише близько 0,6 % днів року мають гострі значення), і високі показники комфортності свідчать про добру придатність Луцька та Світязя для господарської, рекреаційної, туристичної діяльності.

Головні висновки. Патогенність клімату в Луцьку та Світязі протягом року, за результа-

тами аналізу загального індексу патогенності $I_{\text{сумар}}$ В.Г. Бокші, змінюється від оптимальних значень $I_{\text{сумар}}$ влітку до подразнюючих взимку, гострих значень не набуває, за виключенням окремих днів (21 – 23 дні). Середні місячні значення індексу патогенності коливаються в межах від 3,8 балів (червень) до 26,4 балів (лютий) для Луцька та в межах від 4,9 балів (червень) до 26,02 балів (лютий) для Світязя. Найвищі показники $I_{\text{сумар}}$ визначені для холодного періоду року (Луцьк: листопад – березень, від 13,6 до 26,4 балів; Світязь: від 13,7 до 26,02 балів), а найнижчі – для теплого періоду (Луцьк: червень – жовтень, 3,8 – 8,5 балів, Світязь: 4,9 – 10,9 балів). Середні місячні значення індексу $I_{\text{сумар}}$ у Луцьку та Світязі коливаються у схожих межах, демонструючи велику мінливість патогенності протягом року. Однак у Світязі середні значення індексу патогенності $I_{\text{сумар}}$ є дещо вищими. Комфортність клімату, таким чином, вища для Луцька. Ми припускаємо, що це пояснюється

пом'якшуючим впливом великого міста на мікрокліматичні показники (менші перепади температури, вищі температури холодного періоду року, згладжений по сезонах хід швидкостей вітру, місто «гасить» його швидкості).

Перспективи використання результатів дослідження. Перспективним для продовження даного

дослідження є його поширення на більші за площею регіони (наприклад, Північно-Західне Полісся). Показники біокліматичних індексів, розраховані в окремих населених пунктах, можуть також додаватися до щоденних прогнозів погоди з метою інформування про сприятливість чи несприятливість погодних умов для самопочуття і фізичної активності людини.

Література

1. Архів погоди Волинського обласного центру з гідрометеорології. URL: <http://www.meteolutsk.net.ua>
2. Бойко І.Д., Савранчук, Л.А. Туристична курортологія. Чернівці: Рута, 2007. 116 с.
3. Бокша В.Г., Богущкий Б.В. Медична кліматологія та кліматотерапія. К.: Здоров'я, 1980. 261 с.
4. Грабко Н.В., Полетаєва Л.М.; Федченко О.В. Біокліматичні показники території як складова рекреаційного потенціалу Первомайського району Миколаївської області. *Природничий альманах. Біологічні науки*. Миколаїв: 2019. № 26. С. 37 – 49.
5. Малицька Л.В. Комфортні та дискомфортні для людини умови погоди на Поліссі: стан та тенденції зміни. *Українське Полісся: проблеми та тренди сучасного розвитку*: матеріали Всеукр. науково-практичної конференції (м. Ніжин, 1–2 березня 2021 року). Ніжин: НДУ ім. Гоголя, 2021. С. 20 – 26.
6. Мирка В.В., Федонюк В.В., Іванців В.В., Федонюк М.А. Порівняння динаміки мікрокліматичних показників на території Черемського природного заповідника у XX та XXI ст. *Екологічні науки*. 2022. № 7 (40). С. 120 – 125. URL: <http://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2022/1/22.pdf>
7. Польовий А. Оцінка комфортності погодно-кліматичних умов в Українських Карпатах для кліматотерапії та рекреації. *Вісник Київського національного університету культури і мистецтва*. Серія : Туризм. 2019. Т. 2, № 1. С. 60 – 79.
8. Федонюк В.В., Роїк І.О. Проблеми метеорологічної чутливості та методи її зниження. *Сучасна наука та освіта Волині : збірник матеріалів науково-практичної онлайн-конференції (20 листопада 2020 р.) / упоряд., голов. ред. О. Ю. Ройко. Луцьк : Вежа-Друк, 2020. С. 217 – 220.*
9. Федонюк В.В., Федонюк М.А. Дослідження сезонної динаміки атмосферного тиску в м. Луцьку. *Фізична географія та геоморфологія*, К.: 2016, № 4. С. 82 – 89.
10. Шевченко О.Г. Порівняльний аналіз біокліматичних індексів для оцінки комфортності урбанізованого середовища в теплий період. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*, 2016, № 3. С. 105 – 115.
11. Lee H., Holst J., Mayer H. Modification of Human-Biometeorologically Significant Radiant Flux Densities by Shading as Local Method to Mitigate Heat Stress in Summer within Urban Street Canyons. *Advances in meteorology*. 2013. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/312572>
12. Pavliuk M., Fedoniuk V., Vavdiuk N., Fedoniuk Yu. Distribution of V. Boksha's Bioclimatic Index in Ukraine and the Development of an Automated Application for Its Determination. *GeoTerrace-2025. International Conference of Young Professionals*. 6-9 Oct 2025, European Association of Geoscientists & Engineers. Volume 2025. P. 1 – 5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202552084>
13. Fedoniuk V., Zhadko O., Vovk O., Fedoniuk M., Ivantsiv V. Monitoring of Climate Changes and the State of Natural Complexes of the Cheremsky Nature Reserve. *Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. 17th International Scientific Conference. Publisher: European Association of Geoscientists & Engineers. Source: Conference Proceedings, 7-10 Nov. 2023, Volume 2023. P. 1 – 5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520175>
14. Fedoniuk V., Khrystetska M., Fedoniuk M., Merlenko I., Bondarchuk S. Shallowing of the Svityaz Lake in the context of regional climate change. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 2020. 29 (4). P. 673 – 683. DOI: <https://doi.org/10.15421/112060>
15. Fedoniuk V., Fesyuk V., Fedoniuk M. Analysis of the dynamics and precipitation regime in the cross-border region Poland-Belarus-Ukraine (2010-2018). *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. Dnipro: 2023. 32 (2). P. 241 – 253. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.15421/112323>

Дата першого надходження статті до видання: 02.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

THE ASSESSMENT OF POPULATION EXPOSED TO THE RISKS OF FILLING STATIONS OPERATION

Radomska M.M.¹, Huz V.V.²

¹Kyiv Aviation Institute

L. Huzar Ave., 1, Kyiv, 03058, Ukraine

²JSC “Ukrnafta”

Nestorivskyi Lane, 3-5, 04053, Kyiv, Ukraine

m.m.radomskaya@gmail.com

The article investigates the environmental aspects of the operation of filling stations as significant sources of anthropogenic load on the urban environment. It was established that the main factors of influence are emissions of volatile organic compounds, pollution of soils and groundwater in case of fuel leaks, as well as noise pollution. Based on the analysis of scientific sources, it is shown that gas stations are objects of increased environmental hazard, which require strict regulation, systematic monitoring and implementation of modern environmental protection technologies. It is proposed to consider such aspects of the impact of filling stations on the environment as latent and residual risks, especially in terms of soil and groundwater pollution. The activities of gas stations of PJSC “Ukrnafta” in Kyiv were analyzed and individual spectra of environmental risks for each facility were determined. The most significant problems are an insufficient level of landscaping or structure of green spaces, placement in conditions that exacerbate negative impacts on the environment, and generally inadequate attention to the environmental aspects of filling station operation. It is shown that the modernization of filling stations often does not involve the replacement of technological equipment, which, together with the long period of operation of filling stations without regard to the associated environmental pollution, are prerequisites for the formation of latent and residual risks for the population. An assessment of the potential number of the population falling into the zone of influence of risks from filling stations activities was carried out. The main groups of the affected population were determined – inhabitants of residential buildings located in the zone of influence of filling stations, consumers of services and filling stations employees. Specific practical recommendations were developed to improve the environmental safety of filling stations, taking into account the planning features of the territories based on a combination of engineering and biofiltration solutions. The results obtained can be used to limit the negative impact on public health, especially during periods of difficult weather conditions and to modernize the fuel infrastructure in accordance with European standards. *Key words:* risk assessment, residual risks, latent risks, soil pollution, pollution control.

Оцінка експозиції населення до ризиків від експлуатації АЗС. Радомська М.М., Гузь В.В.

У статті досліджено екологічні аспекти функціонування автозаправних станцій як вагомих джерел антропогенного навантаження на міське середовище. Встановлено, що основними чинниками впливу є викиди летких органічних сполук, забруднення ґрунтів і підземних вод у разі витоків пального, а також шумове забруднення. На підставі аналізу наукових джерел показано, що АЗС належать до об'єктів підвищеної екологічної небезпеки, які потребують суворого регулювання, системного моніторингу та впровадження сучасних природоохоронних технологій. Пропонується розглядати такі аспекти впливу АЗС на довкілля як латентні та залишкові ризики, особливо в частині забруднення ґрунтів та підземних вод. Проаналізовано діяльність АЗС ПАТ «Укрнафта» у м. Києві та визначено індивідуальні спектри екологічних ризиків для кожного об'єкта. Найсуттєвішими проблемами є недостатній рівень озеленення або невдала структура зелених насаджень, розміщення в умовах, які посилюють негативні впливи на довкілля, та загалом неналежна увага до екологічних аспектів функціонування АЗС. Показано, що модернізація АЗС часто не передбачає заміну технологічного обладнання, що разом з тривалим періодом експлуатації АЗС без уваги до супутнього забруднення довкілля є передумовами формування латентних та залишкових ризиків діяльності АЗС для населення. Проведено оцінку потенційної кількості населення, що потрапляє в зону впливу ризиків від діяльності АЗС. Визначено основні групи ураженого населення – мешканці житлових будинків, що розташовані в зоні впливу АЗС, споживачі послуг та працівники АЗС. Розроблено специфічні практичні рекомендації для підвищення екологічної безпеки АЗС з урахуванням планувальних особливостей територій на основі поєднання інженерних і біофільтраційних рішень. Отримані результати можна використати для обмеження негативного впливу на здоров'я населення, особливо в передоді ускладнених метеоумов та для модернізації паливної інфраструктури відповідно до європейських стандартів. *Ключові слова:* оцінка ризиків, залишкові ризики, латентні ризики, забруднення ґрунту, контроль забруднення.

Relevance. Nowadays, high traffic intensity and dense urban development in Kyiv have led to a significant concentration of fuel filling stations within residential areas. Large fuel companies play an important role in the city's fuel infrastructure, but simultaneously create technogenic pressure on the urban environment,



including air pollution, risks of soil and groundwater contamination and noise impact.

The relevance of the topic of filling station operation and efficient management is growing in connection with Ukraine's transition to energy independence and diversification of fuel sources. In modern economic conditions, when there is a gradual transition to environmentally friendly types of energy, filling stations are transformed into multimodal energy hubs. Along with traditional petroleum products, they increasingly offer alternative fuels – bioethanol, biodiesel, gas fuels (LPG, CNG), as well as charging stations for electric vehicles. In times of hostilities, interruptions in the import of petroleum products and intermittent power supply the demand for filling stations services grows dramatically. Despite this immense economic and social role, filling stations still undergo environmental regulation and their modernization needs considerable attention and rigorous analysis of outcomes and environmental impacts.

Problem statement. Today, the network of filling stations is not just fuel dispensing points, but modern infrastructure complexes that combine technological, commercial and service functions. They provide not only the sale of fuels, but also create a convenient space for consumers, combining fuel provision, trade and service sectors. The development of the filling station network is an important indicator of the level of urbanization, mobility of the population and transport intensity of the country [1]. In recent years, the number of filling stations has increased, which is associated with an increase in the motorization of the population, the expansion of networks of international operators and an increase in demand for high-quality energy resources. Moving towards potential clients, filling stations are now often located in close proximity to residential and office buildings. Their operation is considered to be relatively safe for the population, but these claims must be based on sound research data and definitely be site specific, as potentially exposed population differs considerably just like hazards imposed by a filling station depend on multiple factors.

From the other perspective, assessing the environmental impact of filling stations operated by large companies is highly relevant for ensuring environmental safety and sustainable development of urban territories on the whole, since they are able to implement environmentally friendly solutions at large number of objects at the same time and thus affect big areas. However, there is an issue currently underestimated when considering the development of small industrial facilities: their modernization generally positive for the environment quality in the impact area might leave residual impacts and related risks for the population.

Literature review. A filling station is a complex engineering and technological facility designed for the safe reception, storage and release of motor fuels of various types. Its operation is ensured by the coordinated interaction of technological, energy, hydraulic and con-

trol systems, each of which has its own functional load. Therefore, a filling station should be considered a micro-technological complex in which physical and chemical processes take place that require strict control of pressure, temperature, density and tightness parameters. This in its turn means that they contain forces and media which impose certain health threats when released in the environment and the potential for their release is contained in the station as itself.

The technological scheme of filling station includes tank farm and storage systems, fuel reception unit, fuel supply system, fuel dispensers, as well as auxiliary systems like operator's room, control systems and service area (tire servicing systems, car washing, and areas for express maintenance of vehicle's). Most filling stations now include shops and cafes to provide all possible needs of the drivers and passengers.

The safety and security of filling stations is provided by environmental, ventilation and fire infrastructure. In particular, reservoir ventilation systems include breathing valves, which maintain stable pressure in the tank farm, preventing the formation of explosive concentrations of fuel vapors inside tanks. As a result of their operation a portion of hydrocarbon gases evaporated from the fuel inside the reservoir is displaced into the air and forms routine emissions from fuel filling stations. The height of the ventilation pipes is usually at least 4 meters from ground level, which ensures the dispersion of vapors in a safe layer of air [2]. Recovery of these vapors is also possible if such systems are installed at the station, which is not compulsory.

Accidental spills are also possible at the territory of the station, but they are minimized with the help of automated systems of filling used in reservoirs and car tanks.

But even with these precautions, each filling station is equipped with fuel outlets and an emergency system for collecting spilled fuel. The surface of these zones has a slight slope towards fuel wells or sealed trays, directing fuel to special collection tanks. This avoids the ingress of petroleum products into the soil, storm sewers or natural reservoirs. The collected fuel residues must be disposed of or returned for recycling. Also, fire outlets for surface runoff are mandatory, which direct water from foaming or draining to isolated storage tanks, preventing it from spreading [3].

To reduce the man-made load on the environment, local treatment facilities are used at filling stations, which purify flush and rainwater from oil products, mechanical impurities and suspended substances. Oil traps, sorption filters and coalescence units provide a cleaning efficiency of at least 80% and might be further improved with application of novel biological methods [4, 5]. After treatment, water can be discharged into the storm network or reused for technical needs, which corresponds to the principles of closed water circulation.

In addition, the environmental infrastructure includes gas analyzers, air monitoring and water pollution control systems, which provide automated records of gasoline,

methane or carbon dioxide vapor concentrations in the working area.

An important role in creating barrier for the impacts of filling stations is played by green plantations, which are located around the perimeter of the territory of the filling station within their sanitary protection zone. They reduce noise levels, capture dust and partially absorb volatile hydrocarbons. According to the norms, the minimum sanitary distance from the border of filling stations to residential buildings must be at least 50 meters for medium-sized stations and up to 100 meters for large ones. Green plantings form a biofiltration screen of dense tree and shrub species that have a developed leaf surface (birch, maple, linden, spruce, thuja).

Being quite small industrial facilities, filling stations still produce a wide range of impacts on the environment. During the operation of filling stations, dozens of compounds of organic and inorganic origin enter the air. Their concentrations depend on the type of fuel, the volume of sales, the tightness of the systems, temperature conditions and the availability of recovery devices [6]. The greatest danger is posed by volatile organic compounds (petrol, toluene, xylene) that have carcinogenic, general toxic or irritating effect, as well as combustion products of car engines that enter filling stations, nitrogen oxides, carbon monoxide and aldehydes [7].

The second important factor in the negative impact of filling stations is the risk of contamination of soils and groundwater in case of violation of the tightness of technological equipment – tanks, pipelines, valves or drain connections. Even minor leaks of fuels can cause persistent and long-term pollution, since petroleum products are retained in the soil structure and bound to its elements [8]. Once in the soil, they will eventually reach the surface of groundwater and from there can get into water supply system or into surface water bodies. In water petroleum products and their derivatives interfere with natural aeration, reduce the concentration of dissolved oxygen and disrupts the processes of self-purification of the aquifer [9]. The same set of effects is valid for the soil contaminated with fuels: they reduce water permeability, gas exchange and the activity of microorganisms in soils [10]. This leads to the termination of the biological cycle, the death of the root system of plants, a decrease in fertility, and in case of contamination entering aquifers, to a deterioration in the quality of drinking water [10]. In addition to organic compounds, heavy metals (lead, copper, zinc) from anti-corrosion coatings of pipes and equipment, as well as surfactants, which slow down the natural biodegradation of hydrocarbons, can enter the water [11]. To prevent these processes, modern filling stations use double-walled tanks with inter-wall space control, waterproofed platforms, fuel collection trays and emergency spill containment systems.

The soil and subsequent water pollution are the greatest hazards for the environment from filling stations, since they are the least visible and controlled. Air pol-

lution is given primary attention, because it is linked to direct losses of valuable resources sold to the customers, and it is the type of impacts which is provided with established methods of calculation and them included into regular formal reports to the environmental authorities. In case of soil and underground waters pollution there are no obligatory control over these media within responsibilities of filling stations operators. The general requirement is that observation control wells must be installed, which allow regular chemical analysis of groundwater for the presence of petroleum products. However, this is not always the case and the usual type of control conducted is visual examination of reservoirs only when they must be cleaned before the input of fuel, different from what were stored before. The defectoscopy of reservoirs' is supposed to be conducted every 5 years, while control of fuel dispensers is performed more often – every year. This by any means isn't enough for the declaration of filling stations safety. Rather it is possible to say that there exists latent risk from soils and underground waters pollution due to operation of filling stations.

Latent risk, mostly used in medical sciences, could be also applied to hidden environmental threats, which are not evident, but persistent and able to cause development of certain diseases in long-term perspective [12]. In this paper we refer to latent risks as a possibility of respiratory and cardiac diseases due to exposure to air pollutants (VOCs, dust and combustion products from filling stations). This unseen risk underscores the long-term health consequences associated with air pollution, emphasizing the importance of preventative measures and public health initiatives.

This latent risk is intrinsic to the technology of fuels storage and distribution, yet it differs considerably depending on a set of factors:

- volume of fuel reservoirs
- reservoirs turnovers;
- properties of soils, in particular, pH, salinity, microbial activity, humidity;
- hydrological conditions of the area and depth of the aquifers;
- age of the filling station.

The later factor might have a very profound effect: the longer a filling station exists and operates, the higher the probability of reservoir insulation failure. This would also mean deeper propagation of the pollution front and probability that it has reached the level of underground waters. Moreover, this pollution fringe might be travelling to deep to be detected yet still able to cause considerable degradation of water quality. Such probability especially relevant if the filling station is not used for certain time or when modernization or rebranding is conducted. Modernization doesn't always mean and in most cases doesn't involve at all the change of reservoirs. Rather, it is limited to the renovation of surface structures, so that they convey the image of new facility, which offers improved

service. This is usually true, but in terms of the environmental profile could be misleading: renovated appearance of the filling station makes most people think that it was fully remade, including change of reservoirs and other equipment, or that it employs the best and most modern solutions and equipment. This forms preconditions to the formation of residual risks, which are not evaluated and often omitted in the assessments. The concept of residual risks is also more typical for the medical studies and it is used to cover the possibility of patient condition deterioration even after optimal treatment of risk factors [13]. In this case we would like to apply this category to the hazards present in the environment even after the seizure of industrial activity due to pollution accumulated and retained in the environment.

But in case of full-scale modernization the residual risks are also relevant since the environmental audit of the territory is not conducted, being too expensive for such small enterprises. As a result, the residual soil pollution persists in the environment and potential contributes to the health risks formation.

The aim of the paper is to identify the potential residual risks from filling stations for the neighboring residential areas based on exposure assessment for selected filling stations and define general patterns of their environmental performance development.

Novelty. The paper applies the concept of residual and latent risks to the operation of filling stations, which is a new approach. Additionally, the environmental performance of the filling stations is considered on a time scale, thus providing insights into real interaction of industrial facilities of this type with the environment.

Applied importance. The results of assessment could be implemented in the development of recommendations on more efficient and safe management and environmental monitoring of filling stations, as well as planning environment revitalization activities, where it is found necessary.

Methods and Materials. As a part of the given research a range of filling stations were chosen for the analysis. All filling stations selected are located within the city of Kyiv and belong to JSC "Ukrnafta". They are distributed between different functional areas of the city allowing assessment of impacts depending on the intensity of traffic flows, building density, and planning features of the territory.

Each filling station was visited and the express assessment of its environmental performance was conducted. These included following issues:

- compliance with the sanitary protection zone (SPZ) requirements with particular attention to the presence of sensitive receptors (residential houses) within the SPZ;
- quality of landscaping within the SPZ: presence, structure, and condition of green spaces, as well as the share of SPZ under greenery, which is supposed to be 40%;

- visual control of equipment, focused on its integrity and operability and with special attention to the presence of any forms of leakage control systems;
- availability and validity of fuel quality documentation;
- noise levels produced by filling stations operation, which is basically sound produced by cars, coming to use services at filling stations.

The results were then evaluated in terms of potential human exposure, based on the approximation of population residing in the impact area. The approximation was performed within the standard risk assessment framework. The hazards and potentially affected population were defined, which is "Exposure assessment" step at the risk assessment process. Since exact concentrations of pollutants were not measured the health risks were not calculated.

The population under threat was evaluated based on the following assumptions:

1) The location of each filling station relative to nearby residential buildings was assessed, including the distance to apartment blocks, private housing, and mixed-use developments. The density of residential development within and adjacent to the sanitary protection zone was taken into account, as well as the number of potential permanent residents living in close proximity to the filling station who may be exposed to noise, air emissions, and other operational impacts on a daily basis.

2) The scale and capacity of each filling station were considered. The size of the station, number of fuel dispensers, types of fuel offered, and total turnover were used as indirect indicators of the potential number of clients served per day. Larger filling stations with higher traffic capacity were assumed to generate greater flows of vehicles and people, thereby increasing the number of individuals temporarily exposed to environmental and acoustic impacts.

3) The availability of additional services at filling stations was also accounted. The presence of convenience stores, cafes or food courts, car washes, service stations, and charging points for electric vehicles was considered a factor that prolongs the duration of customer stay on the site and attracts non-fuel-related visitors. Such multifunctional use was assumed to significantly increase the daily number of visitors and, consequently, the size of the population potentially affected by the station's operation.

4) The surrounding urban infrastructure was considered. The presence of shopping centers, office buildings, business centers, public transport stops, and other facilities in the immediate vicinity of filling stations was considered a factor contributing to increased pedestrian and vehicle traffic. Filling stations located near such infrastructure were expected to interact with a wider and more dynamic group of population.

Finally, the age of filling stations, changes in operations, including modernization, were considered factors,

which contribute to residual risks formation, and thus were taken in consideration in the assessment.

Results and Discussion. All filling stations under consideration sell a wide range of fuels: A-92, A-95, A-95 with additives, and A-98 petrol, as well as diesel fuel (with additives). The capacity of filling stations ranges from approximately 9–11 m³ for small filling stations to over 100 m³ for the largest facilities. Such storage volumes create potential environmental risks, especially when continuous control over their potential effects is not provided. Moreover, high concentration of large tanks in densely populated areas increases health risks, due to air, soil, and water pollution.

The analysis of their environmental performance showed a range of drawbacks, which significantly increase their potential impact on the environment and contribution to risks formation. In particular, the most common gaps are insufficient landscaping or ill structure of the available plantations, as well as complicated location, which rises risks from their operation. However, certificates of all stations are valid and minimal requirements over the safety and security control are performed, which doesn't exclude the presence of issues. These gaps must be filled in an individual way:

1. The filling station 1, 9, 10, 13, 15 and 16 have sufficient space, a well-maintained sanitary protection zone, and equipment in good working order, but the level of greenery is below the norm, which reduces its protective properties. It is recommended to increase the proportion of green plantings to at least 40-60% and to install a double row of green barriers along the road and around the perimeter of the site. Since there are other buildings and a car shop nearby, it is advisable to strengthen noise protection and inspect drainage channels to prevent petroleum products from entering the storm sewer system.

2. The filling station 3, 4 and 6 have has sufficient greenery and a functional drainage and storm sewer system, but the tall trees (poplars in two cases) next to the tank farm pose a fire hazard. It is recommended to replace them with low-growing gas-resistant shrubs and trees. the drainage system should be regularly maintained to prevent fuel from entering the soil.

3. Filling stations proximal to residential and commercial buildings (5, 10, 14) requires strengthening the protective green belt. To improve environmental performance these facilities must be provided with automated air control systems and control of soil and ground waters pollution must be planned for then at least once per 3 years.

4. The filling station 5 at 9 Lugova Street in Kyiv has insufficient greenery and is located less than 40 m from a shopping center and residential building, which increases the impact of noise and fuel vapors on the population. It is recommended to create a dense green barrier between the station and the nearest buildings, provide noise protection, and modernize surface drainage. Transparency and accessibility of the tank farm should also be ensured to monitor the condition of the equipment.

5. The filling stations 8 and 12 have the worst environmental performance, since the almost or completely lack green plantations, lack modern drainage system and in case of the facility at 27b Perova Avenue the outdated technical equipment further increases negative impacts on the environment, which call for urgent actions.

A more sophisticated issue of all filling stations, which was defined via personal communication, is that its personnel take care and is well aware about fire hazards, but is almost uninformed about the environmental impacts produced by facilities.

To illustrate the intensity and spatial extent of potential impacts from these filling stations, the gross annual emissions of hydrocarbon vapors from reservoirs were calculated, using standard methodology. The highest values are characteristic of filling stations with the largest total fuel storage volumes (Fig. 1).

In the structure of emissions, the share of petrol is dominant for all sources of emissions due to its higher volatility and bigger turnover. The results of calculations demonstrate that impact area of filling stations is quite big and what is even more important, stretches well beyond the sanitary protection zone, especially at large stations. This affects the potential number of population exposed and thus health risks for them. The impact area for this assessment was therefore defined as double SPZ – 100 m.

The assessment of the population potentially affected by the operation of filling stations was carried out taking into account the functional characteristics of their surrounding areas (Table 1). Particular attention was paid to distinguishing between permanent and short-term exposure, which allows for a more realistic evaluation of the actual impact of filling stations on the population under urban conditions.

Permanent residential exposure was considered only for filling stations directly adjacent to residential buildings. For most filling stations located along major transport corridors, permanent residential population within the sanitary protection zone or in its close proximity is absent.

The number of office workers was estimated only for locations where business centers or shopping malls are directly adjacent to the filling station. The number of industrial and service workers was assessed based on average employment statistics for industrial and transport-related facilities in Ukraine, considering the number of workers simultaneously present within the impact zone. They represent three separate group with different intensity and duration of exposure, i.e. the dose they receive. Workers of the station are subjected to the highest impacts with maximal concentrations in the air of operation area, but working time duration and occupational standards set certain limits. On top of that their objective risk levels might be mitigated by the fact of awareness of being exposed and being informed they can take certain steps for protection and mitigation of health effects via medical services or life style. As for

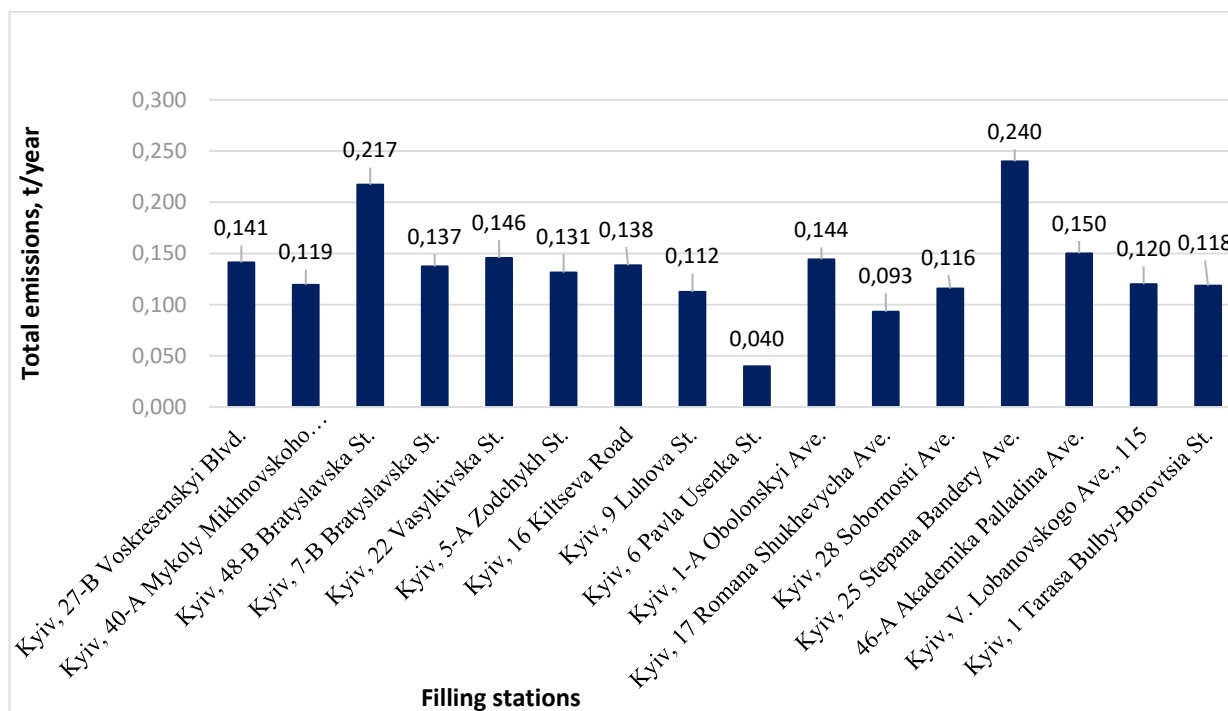


Fig. 1. Emissions of NMVOCs from the reservoirs of filling stations

Table 1

Assessment of potential population affected by Ukrnafta JSC filling stations in Kyiv

№	Filling station location	Category by capacity	Permanent residents	Office workers	Industrial / service workers	Customers (persons/day)
1	16 Kiltseva Road	III	0	0	250–500	1,500–2,000
2	5-A Zodchykh St.	II	0	0	80–150	1,200–1,600
3	1 T. Bulby-Borovtsia St.	II	0	0	80–150	1,200–1,600
4	46-A Akademika Palladina Ave.	III	0	0	150–300	1,400–1,900
5	9 Luhova St.	II	0	600–1,000	200–400	1,300–1,800
6	1-A Obolonsky Ave.	III	0	0	150–300	1,600–2,000
7	25 S. Bandery Ave.	III	0	0	250–500	1,800–2,000
8	27-B Voskresensky Blvd.	II	0	0	150–300	1,100–1,500
9	17 R. Shukhevych Ave.	II	0	0	80–150	800–1,200
10	48-B Bratyslavskaya St.	III	1,200–1,800	0	80–150	1,700–2,000
11	7-B Bratyslavskaya St.	II	0	0	80–150	900–1,300
12	6 Pavla Usenka St.	I	0	0	300–600	500–700
13	28 Sobornosti Ave.	II	0	0	150–300	1,000–1,400
14	40-A Mykoly Mikhnovskoho Blvd.	II	0	800–1,500	80–150	1,000–1,400
15	V. Lobanovskogo Ave., 115	II	0	0	150–300	1,000–1,400
16	22 Vasylykivskaya St.	II	0	0	300–600	1,200–1,600

the permanent residents in the impact area and office staff at commercial facilities they are much more numerous, though the dose they obtain is lower due to significantly decreased concentrations in the air. At the same time, these people are unaware of the possible risks and are additionally subjected to mobilization of pollution retained in soils and groundwaters via dusting and volatilization.

From the results of estimation, it is seen that the highest risks are imposed by filling stations 10 (48-B Bratyslavskaya St.) due to close location of residential buildings and 5 and 14 stations (9 Luhova St. and 40-A Mikhnovskoho Blvd.) with the business centers in the impact area. Thus, these facilities and areas around them must undergo additional control and monitoring to prevent additional morbidity.

The number of customers was estimated based on the typical daily fuel turnover of urban filling stations with regular daily fuel deliveries by tanker trucks and an average refueling volume of approximately 40 l per vehicle. This approach reflects real operating conditions of filling stations and allows for a realistic assessment of the population group with short-term exposure. They undergo the same set and intensity of effects as technological staff of a filling station, but the doses are lower due to shorter stay on site. However, the potential exposure of customers might be increased due to availability of additional services at some filling stations, such as car washes, food courts, coffee areas, shops, and related services. Such facilities significantly increase the time people spend at filling stations, as customers not only refuel (up to 10 minutes) but can also stay at the station for 30 minutes or longer. This means that people are exposed to the complex of the fuel station impacts for a longer time, enough to exert certain negative effects. Additionally, the presence of car washes further increases the level of aerosols, moisture, and chemical reagents in the air affecting consumers.

As for the acoustic pollution, noise measurements were carried out at the studied filling stations during periods of increased traffic intensity. Most filling stations are located near busy roads, which are the sources of constant background noise in the range of 65–80 dB, which is over sanitary standards for residential buildings. The work of equipment produces intermittent noise, which doesn't make significant contribution to the soundscape and is a matter of occupational safety, rather than environmental. However, noise at the vicinity of filling stations could be more intense, because vehicles are changing mode of engines work dramatically, have to perform complex turns and rounds to fit into filling and parking slots. For residents of houses located near such facilities, this can lead to chronic psychological discomfort, increased irritability, and deterioration in sleep quality and overall well-being. Since some filling stations (for example, 25 Stepan Bandera Avenue) are located near complex traffic junctions, the acoustic load is particularly high and constant.

All the filling stations considered were built in 2005–2008 and thus have already been operated almost 20 years, which is the period when the integrity of their reservoirs might start to deteriorate. This makes them all sources of latent risks for soil and groundwaters pollution.

The modernization of these filling stations was aimed at rebranding and thus didn't involve reconstruction of the equipment nor environmental quality assessment according to the official data on site. Moreover, since the time of their construction new residential buildings were built, moving residential area towards filling stations. The automation of technological and security control processes has progressed considerably over the last 20 years, so it is possible to assume that the new pollution from filling stations is limited to certain extent via the control of fuel losses via all pathways. Thus, the residual pollution of soil and groundwaters from previous period of exploitation is the potential source of residual risks for local population. The implementation of these risks is possible via dusting of polluted soils in dry summer season, as well as evaporation of pollution retained by soils and groundwaters. These factors are typically considered not significant, but their combination with pollution from highways in smog-prone periods is a factor of concern for local population and needs attention due to increased potential of the secondary pollution formation.

Conclusions. Based on a field survey of filling stations, it was found that their impact on the environment varies significantly depending on their location, the size of the sanitary protection zone, the condition of green plantings, the presence of drainage channels, the technical condition of equipment, and proximity to residential or industrial buildings. Each filling station has specific characteristics that determine the nature and scale of potential environmental threats – and thus their impact area and potential risk exposure for population varies considerably. That is why recommendations for different facilities cannot be universal: they must be developed individually, taking into account the actual condition of the territory and engineering infrastructure. Overall, the location of filling stations in Kyiv was guided by economic considerations, rather than environmental or security reasoning. As a result, some objects are located too close to populated areas, or on complex relief forms, which created additional risks. Thus, the filling station at 40a Mikhnovskogo Street is located near a multi-story business center and on a hillside, which creates a risk of erosion and flooding, as well as expands the impacts area of the station due to pollution distribution. Obviously, relocation of filling stations outside the risk areas is out of the question, but their latent and residual risks, individual peculiarities of environmental impacts must not be ignored but meticulously studied and managed towards mitigation.

References

1. Poolkrajang A. Service Station Management Factors to Affect Success According to Path Analysis: A Case Study of the Fuel Oil Business. *Journal of Management World*. 2025. № 1. P. 688–695. DOI: 10.53935/jomw.v2024i4.761
2. Hilpert M., Rule A. M., Adria-Mora B., Tiberi T. Vent pipe emissions from storage tanks at gas stations: Implications for setback distances. *The Science of the total environment*. 2019. № 650. P. 2239–2250. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.303
3. Ren C. Fuel loss analysis and compliance management in gas stations. *Academic Journal of Engineering and Technology Science*. 2022. № 5(6). P. 1–6. DOI: 10.25236/AJETS.2022.050601
4. Saharan Y., Singh J., Goyat R., Umar A., Akbar S., Ibrahim A. A. Novel supramolecular organo-oil gelators for fast and effective oil trapping: Mechanism and applications. *Journal of Hazardous Materials*. 2023. № 442. P. 129977. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.129977

5. Pooja S., Berawala N., Patil Y. Automobile service station waste assessment and promising biological treatment alternatives: A review. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2022. № 194(10). P. 753. DOI: 10.1007/s10661-022-10387-z
6. Assessing VOC emissions from different gas stations: impacts, variations, and modeling fluctuations of air pollutants / Heidari E. A., et al. *Scientific Reports*. 2024. 14(1). 16617. DOI: 10.1038/s41598-024-67542-4
7. Allahabady A., Yousefi Z., Mohammadpour T. R. A., Payandeh S. Z. Measurement of BTEX concentration at gas stations. *Environmental Health Engineering and Management*. 2022. № 9(1). P. 23-31. DOI: 10.34172/EHEM.2022.04
8. Predictive analysis and risk assessment of potentially toxic elements in Beijing gas station soils using machine learning and two-dimensional Monte Carlo simulations / Wang M., et al. *Journal of Hazardous Materials*. 2024. № 477. P. 135393.
9. Gao H., Wu M., Liu H., Xu Y., Liu Z. Effect of petroleum hydrocarbon pollution levels on the soil microecosystem and ecological function. *Environmental Pollution*. 2022. № 293. 118511. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.118511
10. Fei-Baffoe B., Badu E., Miezah K., Sackey L. N. A., Sulemana A., Amuah E. E. Y. Contamination of groundwater by petroleum hydrocarbons: Impact of fuel stations in residential areas. *Heliyon*. 2024. № 10. e25924. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e25924
11. Cuput E. L., Mensah L., Bentil E., Amponsah V., Agbekey B. K. Heavy metal contamination from fuel station run-off and carwash wastewater: An assessment of ecological risk and experimental treatment. *Heliyon*. 2024. № 10(7). e29167. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e29167
12. Trace metals in PM10 and associated health risk in two urban sites in Campeche / Bretón S., et al. *Sustainability*. 2023. № 15(20). 14941. DOI: 10.3390/su152014941
13. Al-Kindi S., Paneni F., Brook R. D., Rajagopalan S. Residual environmental risk in patients with cardiovascular disease: an overlooked paradigm. *European Heart Journal*. 2023. № 44. P. 4612–4614. DOI: 10.1093/eurheartj/ehad412

Дата першого надходження статті до видання: 03.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

МОНІТОРИНГ ЕКОЛОГІЧНИХ НАСЛІДКІВ ВОЄННИХ ДІЙ

УДК 528.8:528.9:504.064.3:355.4

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.2-65.43>

ІНТЕГРАЦІЯ ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ ТА CAD-МОДЕЛЮВАННЯ У ПРОЦЕСИ ОЦІНКИ ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ І ВІДНОВЛЕННЯ ТЕРИТОРІЙ ПІСЛЯ ВОЄННИХ ДІЙ

Гребенюк Т.В., Броницький В.О., Ган О.В., Кот І.Т.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Берестейський пр., 37, 03056, м. Київ

t.hrebeniuk07@gmail.com, vadim.bronytskyi@gmail.com, gela170283@gmail.com,

kotivantarasovich@gmail.com

У статті досліджено можливості інтеграції методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), геоінформаційних систем (ГІС) та інженерного моделювання для оцінювання геоекологічних наслідків воєнних дій і обґрунтування заходів відновлення територій. Об'єктом дослідження обрано територію села Кам'янка Харківської області, що зазнала інтенсивного артилерійського та механізованого впливу. На основі аналізу супутникових знімків «до» та «після» бойових дій із застосуванням методу change detection виявлено суттєві зміни землекористування, руйнування інфраструктури та деградацію природних компонентів середовища.

Для кількісного оцінювання змін використано спектральні індекси NDVI та NBR/dNBR, що дозволили ідентифікувати зони деградації рослинного покриву та ділянки термічного ураження.

Встановлено, що утворення вив, порушення ґрунтового профілю та накопичення токсичних речовин формують довготривалі геоекологічні наслідки, зокрема забруднення ґрунтів і підземних вод. Розглянуто особливості дозвільної діяльності у сфері природокористування, зокрема необхідність проведення оцінки впливу на довкілля (ОВД) при реалізації заходів з відновлення територій та гуманітарного розмінування.

Практична значимість роботи полягає у можливості використання запропонованого підходу та інтегрального індексу для підтримки прийняття рішень при плануванні заходів рекультивції, екологічного моніторингу, підготовці матеріалів ОВД та створенні інженерно-графічної документації у CAD- та GIS-середовищах. Отримані результати можуть бути застосовані для обґрунтування ефективних технологій відновлення порушених екосистем у післявоєнний період. *Ключові слова:* дистанційне зондування Землі; геоінформаційні системи; гуманітарне розмінування; деградація ґрунтів; оцінка впливу на довкілля; післявоєнне відновлення територій; просторовий аналіз, CAD моделювання, геоекологічна оцінка.

Integration of remote sensing data and cad modeling into environmental impact assessment and post-war recovery processes.
Hrebeniuk T., Bronytskyi V., Han O., Kot I.

The article investigates the possibilities of integrating remote sensing (RS), geographic information systems (GIS), and engineering modelling for assessing the geoeological consequences of military actions and substantiating territorial restoration measures. The study focuses on the territory of Kamyanka village in the Kharkiv region, which has experienced intensive artillery and mechanized impacts. Based on the analysis of satellite images acquired before and after military operations, and using the change detection method, significant changes in land use, infrastructure destruction, and degradation of environmental components were identified.

For quantitative assessment, spectral indices NDVI and NBR/dNBR were applied, enabling the identification of vegetation degradation zones and areas affected by thermal impact.

It has been established that the formation of craters, disturbance of the soil profile, and accumulation of toxic substances lead to long-term geoeological consequences, including soil and groundwater contamination. The study also considers specific aspects of environmental permitting in the field of natural resource management, particularly the necessity of conducting Environmental Impact Assessment (EIA) during the implementation of post-war restoration measures and humanitarian demining.

The practical significance of the research lies in the applicability of the proposed approach and integrated index for supporting decision-making in land reclamation planning, environmental monitoring, preparation of EIA documentation, and development of engineering drawings in CAD and GIS environments. The obtained results can be used to substantiate effective technologies for the restoration of disturbed ecosystems in the post-war period. *Key words:* remote sensing; geographic information systems; humanitarian demining; soil degradation; environmental impact assessment; post-war territorial restoration; spatial analysis; CAD modeling; geoeological assessment.



© Гребенюк Т.В., Броницький В.О., Ган О.В., Кот І.Т., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. Сучасні воєнні конфлікти супроводжуються значними трансформаціями природного середовища, що проявляються у вигляді руйнування ґрунтового покриву, деградації рослинності, змін гідрологічного режиму та накопичення токсичних речовин. Особливої актуальності набуває проблема мінно-вибухового та техногенного забруднення територій, що створює довготривалі екологічні ризики та обмежує можливості їх подальшого використання.

Традиційні методи оцінювання стану довкілля в умовах воєнного впливу є недостатньо ефективними через обмежений доступ до небезпечних територій, фрагментарність даних та значні часові витрати на проведення польових досліджень. У зв'язку з цим виникає необхідність застосування сучасних інструментів, зокрема дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та геоінформаційних систем (ГІС), які забезпечують оперативне отримання та аналіз просторових даних.

Разом з тим, незважаючи на значний потенціал ДЗЗ і ГІС, існує проблема недостатньої інтеграції отриманих результатів у практику прийняття управлінських рішень, зокрема у процедури оцінки впливу на довкілля (ОВД), планування гуманітарного розмінування та відновлення територій. Відсутність узгоджених підходів до використання супутникових даних у дозвільній діяльності знижує ефективність управління екологічною безпекою в умовах воєнного впливу.

Актуальність дослідження зумовлена масштабними геоекологічними наслідками воєнних дій, що проявляються у вигляді мінно-вибухового забруднення, руйнування ґрунтового покриву, деградації рослинності та порушення водного режиму територій. Такі зміни мають довготривалий характер і створюють суттєві обмеження для подальшого використання земельних ресурсів, а також підвищують екологічні ризики для населення та природних екосистем. Традиційні методи оцінювання стану довкілля в умовах післявоєнного впливу є обмеженими через обмежений доступ до небезпечних територій, фрагментарність польових даних та значні часові витрати на їх отримання. У зв'язку з цим зростає роль дистанційного зондування Землі та геоінформаційних технологій, які забезпечують оперативне отримання, обробку та аналіз просторових даних.

Особливої актуальності набуває інтеграція результатів ДЗЗ та ГІС-аналізу у процедури дозвільної діяльності, зокрема оцінкою впливу на довкілля (ОВД), що є обов'язковим етапом реалізації заходів з відновлення територій та гуманітарного розмінування. Використання супутникових даних, геоінформаційного аналізу та інженерно-графічного моделювання дозволяє забезпечити науково обґрунтоване прийняття рішень, підвищити ефективність екологічного моніторингу та

обґрунтувати вибір технологій відновлення порушених територій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних дослідженнях доведено, що дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) та геоінформаційні системи (ГІС) є ключовими інструментами для оцінювання геоекологічних наслідків воєнних дій. Дані супутникових місій Sentinel та Landsat широко застосовуються для моніторингу стану рослинності, ґрунтів і змін землекористування, що дозволяє оперативно виявляти деградацію територій та наслідки бойових дій [1, 2].

У роботах, присвячених гуманітарному розмінуванню, підкреслюється важливість інтеграції ДЗЗ і ГІС для картографування небезпечних територій, оцінки ризиків і планування операцій очищення місцевості. Зокрема, використання геопросторових технологій дозволяє підвищити ефективність прийняття рішень та оптимізувати процес розмінування [3].

Окрему увагу приділено оцінці екологічних наслідків війни на основі супутникового моніторингу. У звітах міжнародних організацій, зокрема Zoі Environment Network, показано, що поєднання ДЗЗ, просторового аналізу та експертної інтерпретації є ефективним підходом для визначення масштабів руйнувань, деградації екосистем і забруднення територій [4].

Водночас аналіз літератури свідчить, що недостатньо дослідженими залишаються питання інтеграції результатів ДЗЗ і ГІС у процедури оцінки впливу на довкілля (ОВД), дозвільну діяльність та інженерно-графічне забезпечення відновлення територій, що зумовлює актуальність подальших досліджень у цьому напрямі.

Методика дослідження базується на комплексному застосуванні методів дистанційного зондування Землі, геоінформаційного аналізу та інженерного моделювання для оцінювання геоекологічного стану територій, що зазнали воєнного впливу [5, 6].

Об'єктом дослідження обрано територію села Кам'янка Харківської області, яка зазнала значного антропогенного навантаження внаслідок бойових дій. Для аналізу використано супутникові знімки високої роздільної здатності місій Sentinel-2 та Landsat, отримані для двох часових зрізів: "до" початку активної фази бойових дій (рис. 1), "після" воєнного впливу (рис. 2). Використані знімки попередньо пройшли атмосферну та геометричну корекцію і були приведені до єдиної системи координат.

Для виявлення змін використано метод change detection, який дозволяє визначити просторові відмінності між двома часовими станами території. Під час візуального порівняння знімків було виявлено ознаки впливу бойових дій. Тотальне руйнування забудови, на знімку «ПІСЛЯ» (рис. 2) чітко видно відсутність дахів та масштабні руйнування стін у переважній більшості приватних будинків (залишилися лише контури фундаментів та будівельне



Рис. 1. Супутниковий знімок території с. Кам'янка до початку інтенсивних бойових дій



Рис. 2. Супутниковий знімок території с. Кам'янка після бойових дій (фіксація руйнувань забудови та інфраструктури)

сміття). Також зруйновано будівлю Центру надання адміністративних послуг, яка була помітним об'єктом на знімку «ДО» (рис. 1).

Деградація сільськогосподарських угідь. Акуратні, оброблені ділянки відкритого ґрунту (темного кольору на знімку «ДО») повністю заросли неконтрольованою дикою рослинністю (суцільний світло-зелений покрив на знімку «ПІСЛЯ»). Це свідчить про тривале припинення землекористування [7].

Локальні порушення поверхні. На колишніх городах та подвір'ях проглядаються хаотичні світлі плями – вирви від влучань артилерійських снарядів та порушення ґрунтового покриття.

Стан інфраструктури. Дороги загалом проглядаються, але їх контури стали менш чіткими через відсутність експлуатації, можливе пошкодження

покриття та наявність уламків від прилеглих зруйнованих будівель.

Для кількісного оцінювання стану території застосовано спектральні індекси NDVI, NBR, dNBR. Отримані значення дозволяють оцінити ступінь деградації територій, зокрема наслідки пожеж та вибухових впливів [8].

Зміни землекористування (Land Use/Land Cover, LULC) визначалися на основі порівняння класифікованих зображень «до» та «після» воєнного впливу.

Показник зміни землекористування визначається як частка трансформованої площі:

$$\Delta LULC = \frac{A_{\text{changed}}}{A_{\text{total}}},$$

де A_{changed} – площа змінених територій; A_{total} – загальна площа дослідження.

Для комплексного оцінювання екологічного стану територій, що зазнали техногенного та воєнного впливу, запропоновано інтегральний показник – індекс екологічної стабільності території I_{eco} , який поєднує результати дистанційного зондування Землі та просторового аналізу. Індекс обчислюється за формулою:

$$I_{eco} = w_1 \cdot NDVI + w_2 \cdot (1 - dNBR) + w_3 \cdot (1 - \Delta LULC),$$

де $NDVI$ – нормалізований індекс рослинності, що характеризує стан біомаси та рівень відновлення рослинного покриву; $dNBR$ – диференційний індекс вигорання (Normalized Burn Ratio), який відображає ступінь деградації території внаслідок пожеж або вибухових впливів; $\Delta LULC$ – показник змін землекористування (Land Use/Land Cover change), що характеризує ступінь трансформації території; w_1 , w_2 , w_3 – вагові коефіцієнти (0.33), які визначають внесок кожного фактору в інтегральний показник.

Результат розрахунку показав різке падіння значень індексу на ділянках лісосмуг та полів, що свідчить про деградацію рослинності. Розрахунок різниці ($dNBR$) чітко локалізував зони пожеж, спричинених обстрілами.

Виявлені зміни мають катастрофічний характер і прямі наслідки для довкілля. Масове утворення вирв призвело до порушення ґрунтового покриву. Відбувається перемішування горизонтів, хімічне забруднення важкими металами та залишками вибухівки. Пожежі та механічне знищення дерев призвели до зникнення вітрозахисних лісосмуг, що посилює вітрову ерозію. Територія стала абсолютно

непридатною для ведення сільського господарства. Для безпеки населення: щільність вирв та траншей прямо корелює з високим рівнем мінної небезпеки та наявністю нерозірваних боєприпасів (UXO) [9].

Важливим практичним результатом дослідження є можливість інтеграції отриманих даних у процедури дозвільної діяльності, зокрема в оцінку впливу на довкілля (ОВД), планування гуманітарного розмінування та заходи з відновлення територій, що зазнали воєнного впливу.

Результати дистанційного зондування Землі та геоінформаційного аналізу формують інформаційну основу (рис. 3) для деталізації початкового екологічного стану території, що є ключовим етапом проведення ОВД. Зокрема, їх використання дозволяє ідентифікувати зони деградації ґрунтів і рослинного покриву, оцінити масштаби порушення ландшафтої структури, визначити можливі напрями поширення забруднювачів та локалізувати потенційно небезпечні ділянки, пов'язані з мінно-вибуховим забрудненням і техногенними об'єктами.

Отримані геоінформаційні дані використовуються для обґрунтування управлінських рішень на різних етапах відновлення територій, зокрема при визначенні пріоритетних ділянок для гуманітарного розмінування, оцінці доступності територій, виборі оптимальних маршрутів виконання робіт та врахуванні екологічних обмежень. Такий підхід сприяє підвищенню ефективності та безпеки виконання робіт, а також мінімізації вторинного впливу на довкілля.

Інтеграція результатів у CAD-середовище забезпечує створення інженерно-графічної документа-

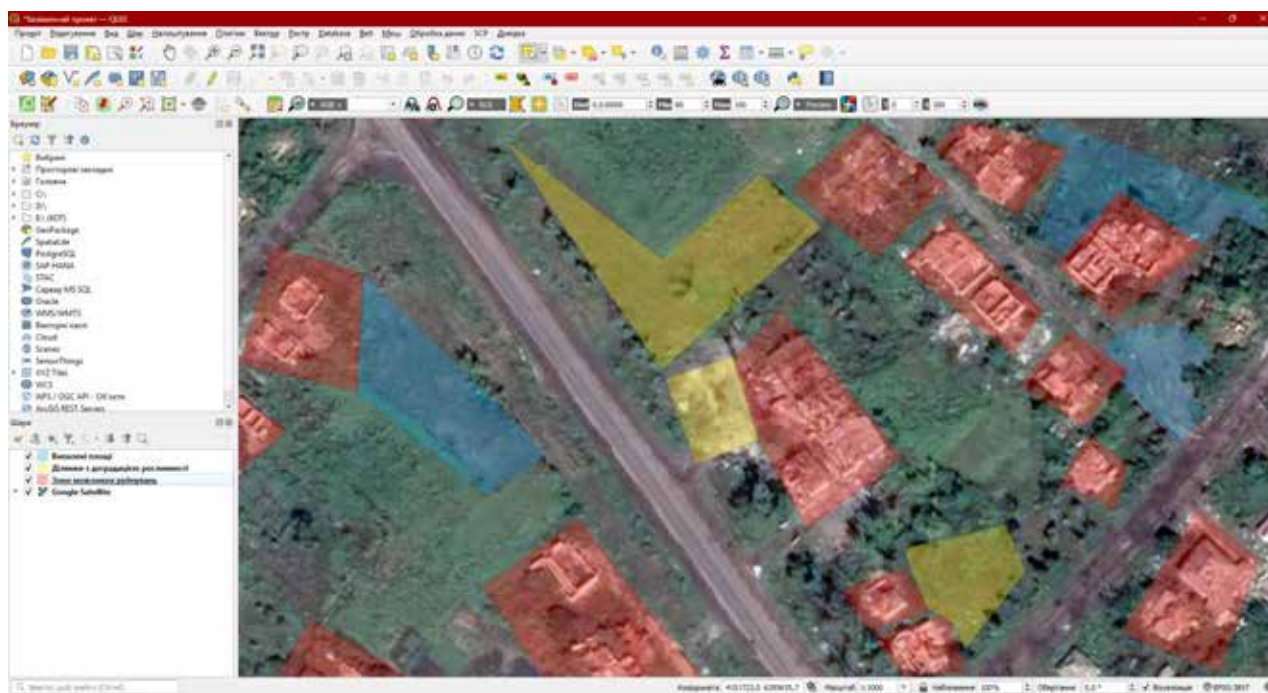


Рис. 3. Візуалізація результатів просторового аналізу зон впливу в середовищі QGIS

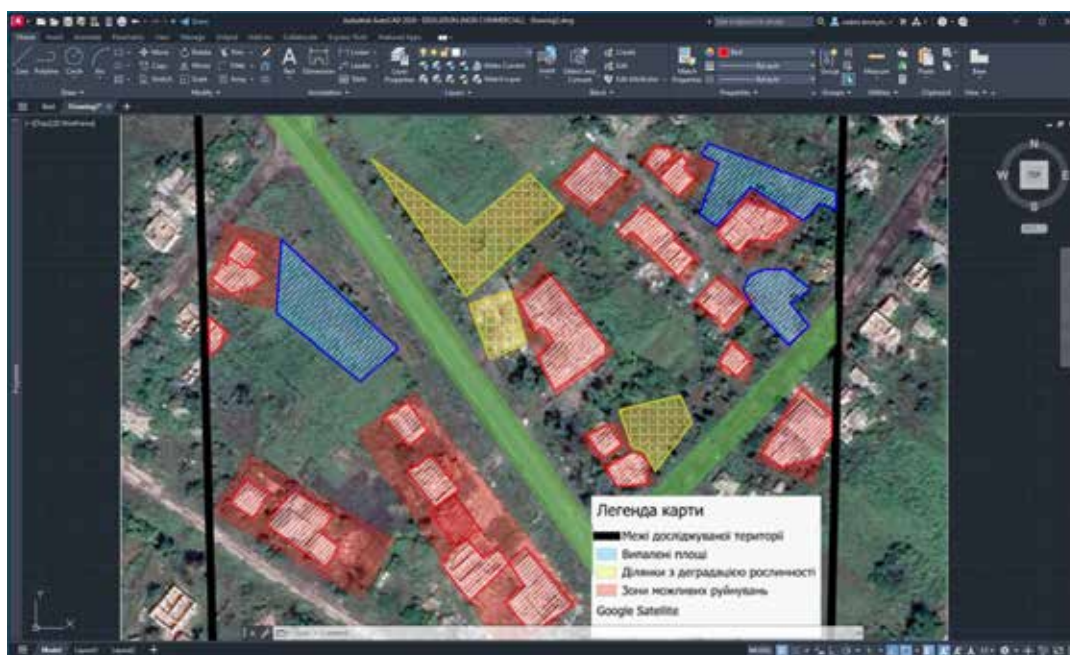


Рис. 4. Інтегрована інженерно-графічна картосхема оцінки впливу бойових дій та планування відновлення у середовищі AutoCAD

ції, зокрема схем зонування територій, планів розмінування та креслень рекультиваційних заходів (рис. 5). Це дозволяє використовувати результати дослідження як доказову базу при підготовці проектної документації, обґрунтуванні природоохоронних заходів і погодженні проектів відновлення територій.

На рисунку 4 представлено інтегровану інженерно-графічну картосхему, створену в середовищі CAD (AutoCAD) на основі геопросторових даних, отриманих за допомогою ДЗЗ та ГІС-аналізу. Ця схема є ключовим етапом у переході від ідентифікації впливу до планування відновлювальних робіт.

На фоновому шарі зображено супутниковий знімок території (імпортованого з QGIS), що надає актуальну візуальну інформацію про місцевість села Кам'янка. На цей базовий шар накладено векторні дані, імпортовані з ГІС, які відображають різні категорії впливу бойових дій: зони руйнувань будівель, що вказує на об'єкти, які потребують реконструкції або повного відновлення; випалені площі, що свідчить про наслідки пожеж та необхідність рекультивації цих ділянок; ділянки з деградацією рослинності, що вимагає заходів з відновлення екосистем та ґрунтового покриву; додатково позначені потенційно небезпечні зони, так і, можливо, території з мінімальним впливом.

Саме в середовищі CAD, ці ГІС-дані перетворюються на основу для розробки детальних інженерно-графічних креслень. Використання CAD дозволяє не тільки інтегрувати просторову інформацію, а й забезпечити високу точність проектування, розробити конкретні конструктивні рішення та наочно візуалізувати інженерні дії, що є критично важливим

для ефективного, безпечного та економічно обґрунтованого відновлення порушених територій.

Висновки. У результаті проведеного дослідження встановлено, що застосування методів дистанційного зондування Землі та геоінформаційного аналізу забезпечує оперативне та достовірне оцінювання масштабів руйнувань і геоecологічних наслідків воєнного впливу на території с. Кам'янка Харківської області. Отримані просторові дані та побудовані картосхеми зон впливу дозволяють ідентифікувати ділянки деградації ґрунтового покриву, порушення рослинності та потенційно небезпечні території, що мають пріоритетне значення для подальшого обстеження та відновлення.

Встановлено, що інтеграція результатів ДЗЗ, ГІС-аналізу та інженерно-графічного моделювання формує інформаційну основу для планування заходів з гуманітарного розмінування, екологічного моніторингу та рекультивації територій. Запропонований підхід дозволяє підвищити обґрунтованість прийняття рішень у сфері екологічної безпеки та оптимізувати визначення пріоритетних ділянок відновлення. Запропоновано інтегральний індекс екологічної стабільності території, який забезпечує кількісне оцінювання ступеня деградації та дозволяє порівнювати різні ділянки за рівнем екологічного порушення.

Отримані результати можуть бути використані як науково обґрунтована база при проведенні оцінки впливу на довкілля (ОВД), підготовці дозвільної документації, а також при розробленні інженерно-графічних матеріалів у CAD- та GIS-середовищах для забезпечення ефективного післявоєнного відновлення територій.

Література

1. Copernicus Programme. Sentinel-2 mission overview URL: <https://dataspace.copernicus.eu/> (дата звернення: 30.03.2026).
2. NASA Earthdata. Landsat missions URL: <https://earthdata.nasa.gov/> (дата звернення: 30.03.2026).
3. Shekhar S. Geospatial technologies for mine action. Amsterdam : Elsevier, 2021. 350 p.
4. Zoï Environment Network. Environmental impacts of the conflict in Ukraine URL: <https://zoinet.org/> (дата звернення: 30.03.2026).
5. Гребенюк Т., Ремез Н., Федченко Є. Застосування моніторингу для обґрунтування біологічного методу відновлення ґрунтів внаслідок воєнних дій. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2025. № 4. С. 163–171. DOI: 10.20535/1813-5420.4.2025.341355.
6. Гребенюк Т. В., Федченко Є. П., Ремез Н. С., Броницький В. О. Моніторинг і екотоксикологічна оцінка ризиків деградації ґрунтів, уражених військовими діями. *Екологічні науки*. 2025. Вип. 6 (63). С. 106–111. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.есо.6-63.17>.
7. Балюк С., Кучер А. Національне багатство України – чорноземи – під загрозою знищення. Як війна впливає на ґрунти й продовольчу безпеку. *Голос України*. 2022. № 245 (7995). С. 6–7. URL: <http://www.golos.com.ua/article/366511> (дата звернення: 30.03.2026).
8. Солоха М. О., Коньшин Р. В., Дегтярьов В. В. Ідентифікатори впливу воєнних дій на ґрунтовий покрив за супутниковими даними. *Таврійський науковий вісник. Серія: сільськогосподарські науки*. 2024. № 137. С. 235–244. DOI: <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.137.29>.
9. Ma Y., Lyu D., Sun K. et al. Spatiotemporal analysis and war impact assessment of agricultural land in Ukraine using RS and GIS technology. *Land*. 2022. Vol. 11, No. 10. DOI: <https://doi.org/10.3390/land11101810>.

Дата першого надходження статті до видання: 30.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

ДИНАМІКА ГЛОБАЛЬНИХ ВИКИДІВ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ ТА ЕКСТРЕМАЛЬНА СПЕКА В УКРАЇНІ: ПРОГНОЗНІ КЛІМАТИЧНІ РИЗИКИ

Коваленко Ю.Л., Ломакіна О.С.

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
вул. Черноглазівська, 17, 61002, м. Харків

Yurii.Kovalenko@kname.edu.ua, olha.lomakina@kname.edu.ua

В останні десятиріччя спостерігається стійка тенденція до накопичення парникових газів в атмосферному повітрі за рахунок антропогенної діяльності людини та критичне зростання темпів накопичення енергії в кліматичній системі. Зазначені процеси призводять до почастищення кліматичних аномалій, зокрема, хвиль екстремальної спеки. Географічне розташування України обумовлює її вразливість до кліматичних змін.

Метою дослідження є встановлення наявності кореляції між зростанням глобальних викидів парникових газів та частотою екстремальних температурних явищ (перевищення температури атмосферного повітря вище за 35°C) у великих містах України за період 1950–2025 роки та оцінка прогностичних кліматичних ризиків на найближчі 25 років.

Проведено інтегрований аналіз архівних даних метеорологічних спостережень глобальних баз даних (EDGAR, IPCC, Global Carbon Project, NOAA GML) та атмосферний реаналіз (ERA5, GHCN-Daily). Застосовано методи статистичного аналізу часових рядів, порівняння кліматичних норм, математичного моделювання та сценарного моделювання (RCP 4.5, RCP 8.5).

Встановлено пряму залежність між накопиченням CO₂ в атмосфері та збільшенням кількості днів з температурою понад 35°C. Доведено перехід від рідкісних аномалій (1950–1999 р.р.) до регулярних теплових хвиль (2010–2025р.р.). Отримано прогностичні моделі для визначення кількості днів екстремальної спеки для п'яти обласних центрів України та визначено стійку подальшу тенденцію до зростання кількості днів з екстремальною спекою, зокрема для м. Дніпро, Запоріжжя та Київ. Також для цих міст зроблено прогностичний розрахунок середньорічної кількості днів з температурою понад 35°C за сценаріями IPCC (RCP 4.5 та RCP 8.5), що підтверджує зростання їх кількості до 2035 та 2050 р.р. *Ключові слова:* парникові гази, екстремальна температура повітря, адаптація до зміни клімату, прогностичні кліматичні ризики

Trends in global greenhouse gas emissions and extreme heat in Ukraine: projected climate risks Kovalenko Yu., Lomakina O.

In recent decades, there has been a steady trend towards the accumulation of greenhouse gases in the atmosphere due to human activity, alongside a critical increase in the rate at which energy is stored within the climate system. These processes are leading to an increase in the frequency of climate anomalies, in particular heatwaves. Ukraine's geographical location makes it vulnerable to climate change.

The aim is to establish a correlation between the increase in global greenhouse gas emissions and the frequency of extreme temperature events (atmospheric temperatures exceeding 35°C) in major cities of Ukraine for the period 1950–2025, and to assess projected climate risks for the next 25 years.

An integrated analysis was conducted of archived meteorological observation data from global databases (EDGAR, IPCC, Global Carbon Project, NOAA GML) and atmospheric reanalysis (ERA5, GHCN-Daily). Methods of time series statistical analysis, comparison of climate norms, mathematical modeling and scenario modeling (RCP 4.5, RCP 8.5) were applied.

A direct correlation was established between the accumulation of CO₂ in the atmosphere and the increase in the number of days with temperatures exceeding 35°C. A transition from rare anomalies (1950–1999) to regular heatwaves (2010–2025) has been demonstrated. Predictive models have been developed to estimate the number of days of extreme heat for five regional centres in Ukraine, and a consistent upward trend in the number of days with extreme heat has been identified, particularly for the cities of Dnipro, Zaporizhzhia and Kyiv. Forecast calculations have also been made for these cities regarding the average annual number of days with temperatures exceeding 35°C under IPCC scenarios (RCP 4.5 and RCP 8.5), confirming an increase in their number by 2035 and 2050. *Key words:* greenhouse gases, extreme air temperatures, adaptation to climate change, projected climate risks

Постановка проблеми. Сучасна глобальна кліматична система перебуває у стані безпрецедентної трансформації, зумовленої антропогенною емісією парникових газів. За даними NOAA, станом на 2024 р. сукупний нагрівальний ефект довгоживучих

парникових газів призвів до поглинання атмосферою додаткових 3,54 Вт енергії на кожен квадратний метр поверхні Землі порівняно з доіндустріальною епохою, а річний індекс парникових газів (AGGI) досяг позначки 1,54 [1], що відображає критичне приско-

рення темпів накопичення енергії в кліматичній системі, що може вплинути на об'єкти інфраструктури та потребує кількісної оцінки.

Актуальність дослідження. Україна розташована у помірно-континентальному кліматичному поясі та демонструє особливу вразливість до кліматичних змін. Спостерігається тенденція до зростання частоти та інтенсивності екстремальних температурних явищ, зокрема, дні з максимальною температурою понад 35°C, які у другій половині XX століття були рідкісними аномаліями, перетворюються на регулярну характеристику літнього сезону.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Прийнятий у 2024 р. Закон України «Про основні засади державної кліматичної політики» визначає основні засади державної кліматичної політики України, що спрямована на досягнення кліматичної нейтральності України до 2050 р., зокрема, в якості проміжної цілі встановлено скорочення викидів парникових газів не менше ніж на 65% відносно базового рівня 1990 р [2]. У грудні 2025 р. було схвалено оновлену Довгострокову стратегію розвитку України до 2050 р [3], яка встановлює як середньострокову ціль державної кліматичної політики скорочення викидів парникових газів для всіх секторів економіки з урахуванням поглинання на більше ніж 65% від рівня 1990 р. Проведення комплексного аналізу взаємозв'язку глобальних викидів парникових газів із кількістю щорічних екстремальних температур атмосферного повітря в Україні, визначення основних тенденцій та прогноз подальших температурних змін в крупних містах України, є підґрунтям для прийняття подальших управлінських рішень з адаптації до зміни клімату як на державному, так і на місцевому рівнях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження глобальних викидів парникових газів базуються на даних провідних міжнародних інституцій. База даних EDGAR (Emissions Database for Global Atmospheric Research) Європейської Комісії забезпечує комплексний облік антропогенних емісій всіх країн світу з 1970 року [4]. Міжурядова група експертів з питань зміни клімату (IPCC) у своїх оціночних звітах систематизує наукові докази щодо впливу парникових газів на кліматичну систему [5]. Глобальний вуглецевий проект (Global Carbon Project) щорічно публікує дані про баланс вуглецю в атмосфері, океані та на суші [6]. Міжнародні проекти атмосферного реаналізу – ERA5 (Copernicus Climate Change Service) [7] та GHCN-Daily (NOAA) [8] – дозволяють верифікувати локальні дані та заповнювати прогалини у спостереженнях.

Питання зміни клімату в Україні, реальні та потенційні наслідки цих змін вже тривалий час знаходяться у фокусі уваги українських наукових інституцій та дослідників. Аналіз зміни температури повітря в окремих містах та областях України

за період 1991–2010 р.р. викладений у дослідженні [9]. Результати дослідження наслідків зміни клімату на окремі компоненти довкілля та сектори економіки, визначення пріоритетних заходів з адаптації до зміни клімату представлені у аналітичній доповіді Національного інституту стратегічних досліджень [10]. Вплив зміни клімату на сільськогосподарський сектор розглянуто у дослідженнях [11, 12], соціально-економічні наслідки – у [13].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Кліматична система Землі протягом останніх семи десятиліть зазнала трансформації, яка не має аналогів у голоценовій історії планети. Основним рушієм цих змін є антропогенне посилення парникового ефекту, зумовлене експоненціальним зростанням концентрації довгоживучих парникових газів (ПГ). Аналіз даних спостережень свідчить про те, що концентрація діоксиду вуглецю (CO₂) зросла з приблизно 314 ppm у 1950 р. до понад 425 ppm станом на 2025 р. Це зростання радикально змінило радіаційний бюджет планети, створюючи «теплову пастку» для інфрачервоного випромінювання.

Попередні дослідження встановили регіональні особливості потепління в Україні: підвищення середньорічної температури на 1,2°C за останні 30 років, зростання за останні роки повторюваності днів з максимальними температурами влітку понад +35°C [10], приріст активних температур повітря вище +10°C для степової і лісостепової зон України та Полісся [12]. Однак комплексний аналіз взаємозв'язку глобальних трендів емісій парникових газів та локальних екстремальних температурних явищ не проводився. Згідно з класифікацією Всесвітньої метеорологічної організації (WMO) та Настановою з метеорологічного прогнозування Українського гідрометеорологічного центру дні з максимальною температурою повітря 35,0°C і вище відносяться до категорії небезпечних гідрометеорологічних явищ [14, 15, 16]. Результати прогнозу зростання кількості днів з температурою більше 35°C відсутні, що і стало чинником проведення цих досліджень.

Новизна. Встановлено кількісну залежність між динамікою глобальних викидів парникових газів та частотою екстремально високих температур (температура повітря вища за 35°C) у великих містах України за період 1950–2025 р.р. та оцінено прогнозні кліматичні ризики.

Виклад основного матеріалу. Аналіз динаміки глобальних викидів та концентрацій парникових газів за період з 1950 р. по 2025 р. виконувався на основі наступних даних:

1. Глобальні викиди парникових газів: річні викиди CO₂, CH₄, N₂O, F-газів по країнах та секторах економіки (1970–2025 р.р.) [4], глобальний баланс вуглецю, викиди від викопного палива та змін у землекористуванні (1950–2025 р.р.) [17], оціночні дані кліматичних характеристик для періоду

1950–1970 р.р. [5], національні історичні ряди емісій CO₂ (1950–2024 р.р.) [18];

2. Концентрації парникових газів: тренди атмосферних концентрацій CO₂, CH₄, N₂O [19], бюлетені парникових газів Всесвітньої метеорологічної організації [20], звіти та часові ряди до 2024 р. [4], оперативні індикатори стану Землі [21, 22];

3. Температурні дані по Україні [7, 8]. Для забезпечення повноти та достовірності температурних рядів пріоритет віддавався офіційним даним наземних метеостанцій, прогалини заповнювалися даними атмосферного реаналізу з використанням методу найближчого сусіда та білінійної інтерполяції для точки розташування міста; верифікація проводилася шляхом порівняння з альтернативними джерелами. Для збирання, накопичення та узагальнення інформації застосовано Gemini PRO.

Аналіз атмосферних концентрацій основних парникових газів за період 1950–2025 р.р. демонструє суттєву трансформацію хімічного складу повітряної оболонки Землі. Ключовим висновком є факт прискорення накопичення цих газів. Збільшення темпів росту CO₂ з 1960-х років та різкий стрибок вмісту метану після 2020 р. свідчать про те, що антропогенний вплив подолав природні буферні механізми.

Аналіз температурних рядів виконувався для п'яти обласних центрів України, розташованих у різних кліматичних зонах: міст Київ, Харків, Дніпро, Запоріжжя та Львів. В таблиці 1. наведено загальну кількість днів з температурою вище за 35°C та їх середньорічну кількість за період по містах, а також динаміка концентрації CO₂ в атмосфері.

Графічну інтерпретацію динаміки викидів CO₂ в процесі спалювання викопного палива, загальних

викидів парникових газів та зміни концентрації CO₂ в атмосферному повітрі наведено на рисунку 1.

Узагальнені дані аналізу зміни концентрації CO₂ в атмосфері та середньорічної кількості днів з температурою більше, ніж 35 °C в містах Київ, Харків, Дніпро, Запоріжжя та Львів наведено на рисунку 2.

Проведений аналіз даних по обраних містах України свідчить про перехід від поодиноких аномалій у 1950–1999 р.р. до системних теплових хвиль у 2010–2025 р.р. Особливо показовим є приклад м. Дніпро, де середньорічна кількість днів із $t \geq 35^\circ\text{C}$ зросла з 0,9 днів на рік у 1950-х роках до 17,4 днів на рік у поточному п'ятиріччі. Історичний рекорд 2024 року – 31 день екстремальної спеки у Дніпрі – став символом нової кліматичної реальності, де третину літнього сезону складають дні з критичним тепловим навантаженням. Дані свідчать про те, що м. Дніпро та м. Запоріжжя є епіцентрами потепління. Зокрема, у м. Дніпро середньорічна кількість спекотних днів у останньому десятилітті зросла майже у 20 разів порівняно з початком спостережень.

Запоріжжя традиційно демонструє високі показники, проте темп зростання тут дещо відрізняється від м. Дніпро. Це може бути пов'язано з локальними особливостями циркуляції та впливом великих водних мас Каховського водосховища (до його руйнування), які чинили пом'якшувальний ефект на мікроклімат. Тим не менш, середня кількість днів у 2010-х роках (9,1) майже вчетверо перевищує норму 1950-х (1,9).

Київ та Харків демонструють явище «кліматичного зсуву». Якщо до 2010 р. дні з температурою понад $t \geq 35^\circ\text{C}$ у Києві були практично відсутні, то за останнє десятиріччя вони стали регулярними. Це вказує на розширення зони впливу гарячих тропіч-

Таблиця 1

Кількість днів з температурою з $t \geq 35^\circ\text{C}$ та динаміка концентрації CO₂ в атмосфері

Період, роки	Міста										Концентрація CO ₂ в атмосфері, ppm
	Київ		Харків		Дніпро		Запоріжжя		Львів		
	Кількість днів 3 t > 35°C	Середньорічна кількість днів 3 t > 35°C	Кількість днів 3 t > 35°C	Середньорічна кількість днів 3 t > 35°C	Кількість днів 3 t > 35°C	Середньорічна кількість днів 3 t > 35°C	Кількість днів 3 t > 35°C	Середньорічна кількість днів 3 t > 35°C	Кількість днів 3 t > 35°C	Середньорічна кількість днів 3 t > 35°C	
1951-1960	0	0	4	0,4	9	0,9	19	1,9	0	0	314
1961-1970	0	0	0	0	6	0,6	10	1	0	0	321,3
1971-1980	0	0	6	0,6	12	1,2	19	1,9	0	0	332,2
1981-1990	0	0	0	0	4	0,4	14	1,4	0	0	346,6
1991-2000	0	0	8	0,8	29	2,9	34	3,4	0	0	362
2000-2010	2	0,2	29	2,9	70	7	51	5,1	1	0,1	379,7
2010-2020	0	0	22	2,2	110	11	91	9,1	1	0,1	400,7
2021-2025	4	0,8	31	0,62	87	17,4	44	8,8	2	0,2	425,7

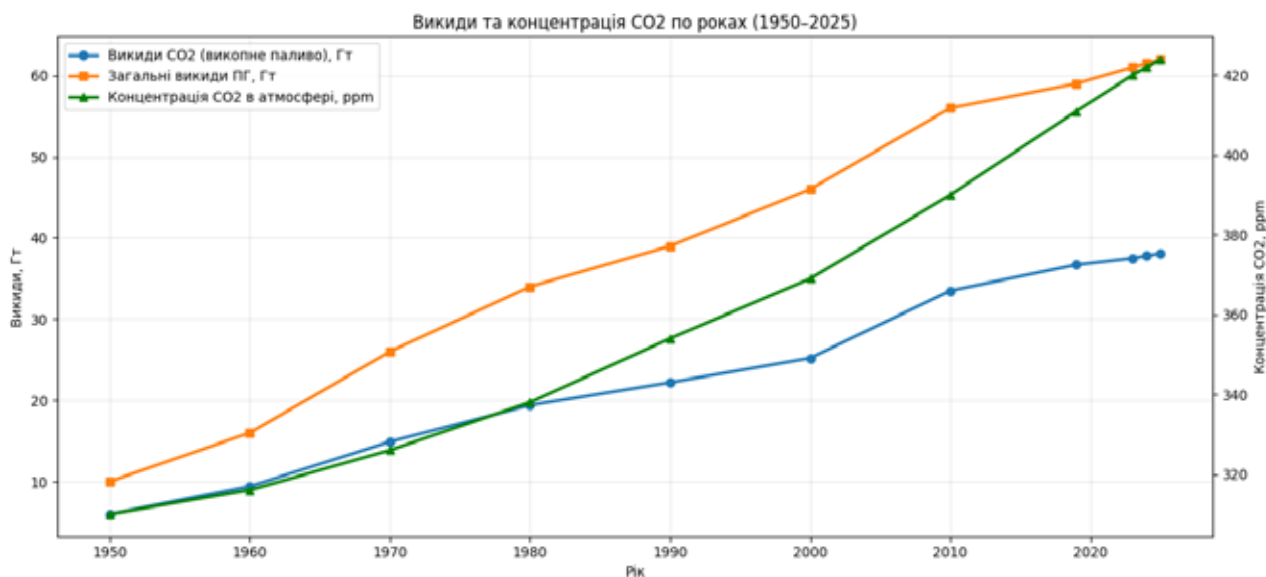


Рис. 1. Динаміка викидів парникових газів та зміни концентрації CO_2 за період 1950-2025 р.р.

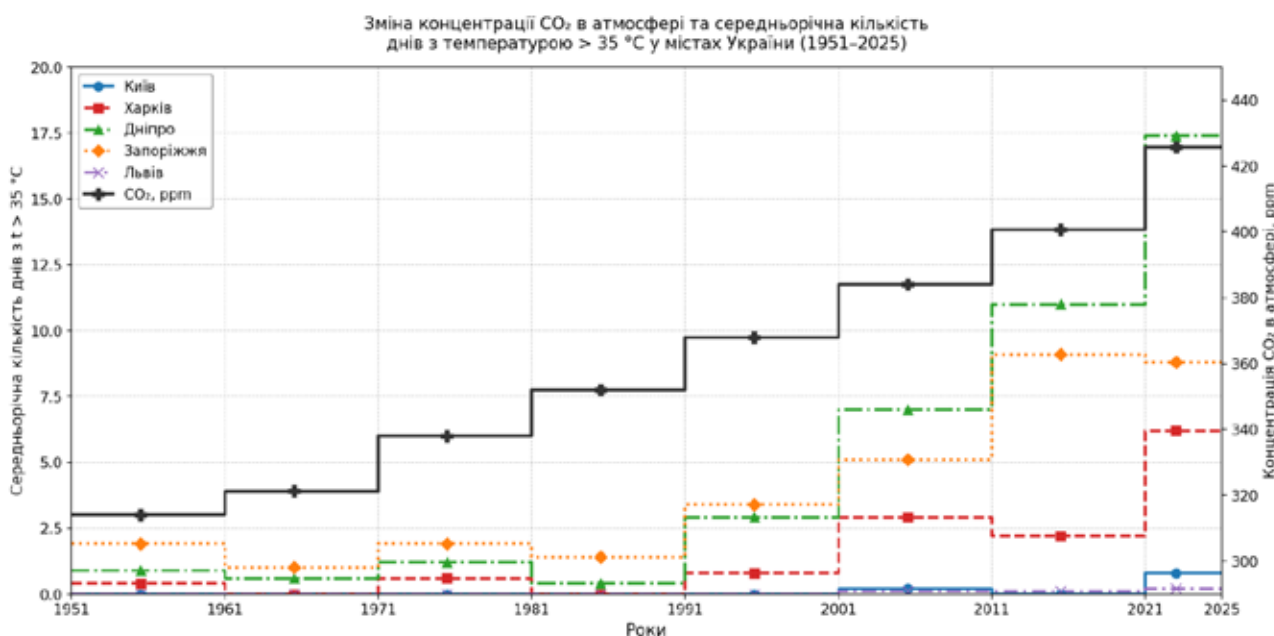


Рис. 2. Динаміка зміни концентрації CO_2 та середня кількість днів з температурою вище за 35°C у містах України за період 1951–2025 р.р.

них повітряних мас та зміщення кліматичних поясів на північ. Харків, як найбільш східний і континентальний з досліджуваних центрів, також зафіксував різкий стрибок частоти спеки: з 0,4 дня у 1950-х до 2,2 дня у 2020-х.

Львів, незважаючи на свій статус найбільш прохолодного великого міста України, також почав фіксувати випадки перевищення літньої температури вище 35°C у 2010, 2015, 2021 та 2024 роках. Хоча середнє значення залишається низьким (0,1 дня), сам факт появи таких температур у перед-

гір'ях Карпат є індикатором глобальної дестабілізації клімату.

Зв'язок між глобальною концентрацією CO_2 та кількістю спекотних днів у м. Дніпро, Запоріжжя та Харків підтверджується коефіцієнтом кореляції. Це дозволяє перейти від описового аналізу до математичного моделювання локальних відгуків на глобальне потепління.

Для кожного з обраних для аналізу міст на основі наведених даних за період 1950–2025 р.р. була розроблена емпірична формула, що дозволяє прогнозу-

вати кількість днів екстремальної спеки. Враховуючи нелінійний характер зростання частоти екстремумів при досягненні критичних порогів глобальної температури, для апроксимації зв'язку між концентрацією CO_2 та кількістю днів спеки N застосовано квадратичну модель

$$N = ax^2 + bx + x,$$

де N – очікувана кількість днів із $t \geq 35^\circ\text{C}$ на рік;

x – концентрація двоокису вуглецю в атмосфері, ppm.

Такий підхід дозволяє врахувати ефект «точки перелому», після якої частота екстремальних подій починає зростати з прискоренням.

Отримано прогнозні моделі для кожного з обраних для аналізу міст, визначено кореляцію між концентрацією двоокису вуглецю та кількістю днів екстремальної спеки та оцінено основні тенденції зміни температурного режиму (таблиця 2).

Представлені у таблиці 2 математичні моделі є інструментом для оцінки ризиків у межах сценаріїв IPCC (RCP 4.5, RCP 8.5). Сценарії IPCC (Representative Concentration Pathways – RCP) є стандартизованими траєкторіями зміни концентрації парникових газів, які використовуються для моде-

лювання майбутнього клімату залежно від обсягів антропогенних викидів. [23]. Ці сценарії описують різні рівні додаткового радіаційного впливу на атмосферу до 2100 р. порівняно з доіндустріальним періодом.

RCP 4.5 (помірний сценарій) передбачає стабілізацію радіаційного впливу на рівні $4,5 \text{ Вт/м}^2$. Це «середній» шлях, за якого світові викиди парникових газів досягають піку приблизно у 2040 р., а потім починають поступово знижуватися завдяки впровадженню нових технологій та кліматичної політики. Очікується, що концентрація CO_2 за цим сценарієм досягне приблизно 540 ppm до кінця століття.

RCP 8.5 (високоемісійний сценарій), який часто називається сценарієм «бізнесу як зазвичай» (business as usual). Сценарій описує світ, у якому не вживається суттєвих заходів для обмеження викидів, і концентрація CO_2 продовжує стрімко зростати, досягаючи понад 940 ppm до 2100 р. Це призводить до екстремального потепління (понад 4°C у глобальному масштабі) та різкого збільшення частоти небезпечних погодних явищ.

Виконано прогнозування на 2035 та 2050 роки за сценаріями IPCC. Для прогнозів використано наступні значення концентрації CO_2 :

аТаблиця 2

Основні тенденції та висновки щодо зміни температурного режиму у містах України

Місто	Прогнозна модель та коефіцієнт кореляції	Основні тенденції та висновки
Дніпро	$N = 0,0018x^2 - 1,17x + 189,4$ коефіцієнт кореляції $r = 0,93$ (дуже сильний зв'язок – добра кореляція)	Місто демонструє найвищу чутливість до зміни радіаційного балансу. Формула для м. Дніпро відображає стрімкий перехід до нового кліматичного стану. Згідно з моделлю, при досягненні концентрації $\text{CO}_2 = 450 \text{ ppm}$, кількість спекотних днів у Дніпрі може перевищити 40 днів на рік.
Запоріжжя	$N = 0,0011x^2 - 0,69x + 110,6$ коефіцієнт кореляції $r = 0,95$ (найвищий ступінь статистичної значущості – відмінна кореляція)	Для міста характерна висока початкова ймовірність спеки, але дещо нижчий темп її зростання порівняно з сусіднім м. Дніпро. Значення коефіцієнта кореляції свідчить про стабільне, але менш вибухове зростання екстремумів у південно-східному регіоні.
Харків	$N = 0,0004x^2 - 0,26x + 43,1$ коефіцієнт кореляції $r = 0,82$ (сильний зв'язок – задовільна кореляція)	Модель відображає континентальний відгук північно-східного регіону
Київ	$N = 0,0003x^2 - 0,02x + 3,08$ коефіцієнт кореляції: $r = 0,55$ (зв'язок помірний через велику кількість нульових значень у минулому – слабка кореляція)	Формула описує ефект «активації» спеки, яка практично не спостерігалася до досягнення концентрацією рівня 380 ppm. За такої динаміки, подальше зростання концентрації CO_2 призведе до того, що київське літо вже у 2040-х роках нагадуватиме сучасне літо у м. Кривий Ріг або м. Миколаїв.
Львів	$N = 0,000015x^2 - 0,009x + 1,44$ коефіцієнт кореляції: $r = 0,68$ (зв'язок помітний – слабка кореляція)	Наразі місто залишається найбільш резистентним до хвиль спеки, однак модель фіксує початок трансформації.

2035 р.: $\text{CO}_2 = 451 \text{ ppm}$ (для RCP 4.5) та 463 ppm (для RCP 8.5);

2050 р.: $\text{CO}_2 = 487 \text{ ppm}$ (для RCP 4.5) та 541 ppm (для RCP 8.5).

Результати прогнозних розрахунків за сценаріями наведено у таблиці 3 та на рисунку 3.

Ґрунтуючись на результатах прогнозних розрахунків, можна стверджувати, що у майбутньому кількість днів з екстремальною спекою у досліджуваних містах буде суттєво зростати.

Висновки. Проведений аналіз динаміки глобальних викидів та концентрацій парникових газів за період 2051–2025 р.р. дозволяє зробити висновок про те, що має місце прискорення накопичення парникових газів в атмосферному повітрі. Збільшення швидкості зростання вмісту двоокису вуглецю та метану вказує на подолання природних буферних механізмів за рахунок антропогенних викидів.

Встановлено кількісну залежність між зростанням глобальних викидів парникових газів та частотою екстремальних температурних явищ в Україні. Відбувається суттєва трансформація температурного режиму великих міст України (м. Київ, Харків, Дніпро, Запоріжжя та Львів). Дні з максимальною температурою (більша за 35°C), які у період 1950–1999 рр. були достатньо рідкісними аномаліями, перетворилися на регулярне явище у 2010–2025 рр.

Встановлено наявність кореляції між концентрацією двоокису вуглецю та кількістю днів екстремальної спеки у всіх аналізованих містах, причому для м. Дніпро, Запоріжжя та Харків цей зв'язок є дуже сильним.

Прогнозування значень середньорічної кількості днів з температурою понад 35°C в залежності від зміни концентрації CO_2 за сценаріями IPCC підтвердило гіпотезу щодо подальшого зростання кількості днів з аномальними температурами до 2035 та 2050 р.р.

Таблиця 3

Прогнозовані значення середньорічної кількості днів з температурою понад 35°C за сценаріями IPCC

Місто	Середньорічна кількість днів з температурою понад 35°C			
	2035 р. (RCP 4.5)	2035 р. (RCP 8.5)	2050 р. (RCP 4.5)	2050 р. (RCP 8.5)
Київ	0,1	0,2	0,5	1,0
Харків	7,1	8,4	11,5	19,4
Дніпро	28,4	33,5	47,8	82,7
Запоріжжя	23,0	26,6	35,5	58,9
Львів	0,4	0,5	0,6	1,0

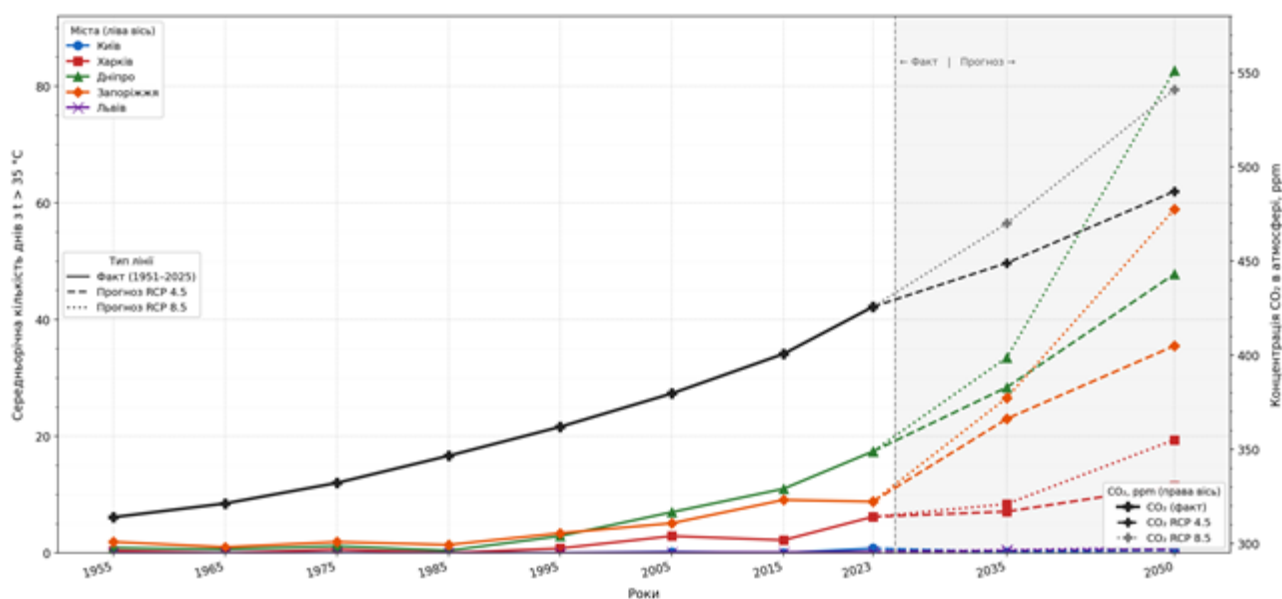


Рис. 3. Зміна концентрації CO_2 в атмосфері та середньорічна кількість днів з температурами вище за 35°C у містах України (1951–2025 р.р.) та прогноз на 2035 та 2050 р.р. за сценаріями RCP 4.5 RCP 8.5

Таким чином, зростання глобальних викидів парникових газів стало прямим драйвером трансформації клімату України. Кумулятивний характер впливу CO₂ та ефект міського острова

тепла перетворили екстремальну спеку на регулярний чинник ризику, що вимагає негайної подальшої адаптації міських систем до кліматичних змін.

Література

1. The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI). *NOAA Global Monitoring Laboratory*. 2025. URL: <https://gml.noaa.gov/aggi/aggi.html>
2. Про основні засади державної кліматичної політики: Закон України від 08.10.2024 р. № 3991-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3991-20#Text>
3. Довогострокова стратегія низьковуглецевого розвитку України до 2025 року. URL: <https://me.gov.ua/view/ba4565a8-544b-4c90-af84-49b2b718f629>
4. GHG emissions of all world countries. Report. *EDGAR – Emissions Database for Global Atmospheric Research*. 2025. URL: https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2025#data_download
5. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. IPCC Sixth Assessment Report. *IPCC. Working Group III: Mitigation of Climate Change*, 2022. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>
6. P. Friedlingstein et al. Global Carbon Budget 2025. *Earth System Science Data*. Preprint. URL: <https://essd.copernicus.org/preprints/essd-2025-659/>
7. Copernicus Climate Change Service (2025): ERA5 hourly time-series data on single levels from 1940 to present. *Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)*. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels-timeseries>
8. Menne, Matthew J., Imke Durre, Bryant Korzeniewski, Shelley McNeill, Kristy Thomas, Xungang Yin, Steven Anthony, Ron Ray, Russell S. Vose, Byron E. Gleason, and Tamara G. Houston. Global Historical Climatology Network – Daily (GHCN-Daily), Version 3. *NOAA National Climatic Data Center*. 2012. doi:10.7289/V5D21VHZ. URL: <https://www.ncdc.noaa.gov/metadata/geoportals/rest/metadata/item/gov.noaa.ncdc:C00861/html#>
9. Осадчий В.І., Бабіченко В.М. Температура повітря на території України в сучасних умовах клімату. *Український географічний журнал*. 2013/ Вип. 4. С. 32–39. URL: https://ukrgeojournal.org.ua/sites/default/files/UGJ_2013_4_32-39.pdf
10. Іванюта С.П., Коломієць О. О., Малиновська О. А., Якушенко Л. М. Зміна клімату: наслідки та заходи адаптації: аналіз. доповідь / ред. С. П. Іванюта. Київ : НІСД, 2020. 110 с. URL: https://niss.gov.ua/sites/default/files/2020-10/dop-climate-final-5_sait.pdf
11. О. В. Шевченко. Вплив кліматичних змін на сільськогосподарське землекористування в Україні. *Збалансоване природокористування*. 2023. Вип. № 4. С. 108–114. URL: <https://journals.urau.ua/bnusing/article/view/292725/290986>
12. Кривохижа Є. М., Матвійшин А. І., Бринь В. Т. Вплив зміни клімату на врожайність основних сільськогосподарських культур в Україні. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*. 2024. Вип. № 3(44). С. 33–37. URL: https://journals.pdu.khmelnitskiy.ua/index.php/podilian_bulletin/article/view/397/356
13. Сарвас С., Мідяний Р., Богдан І., Гадуп'як Н., Марунчак Р. Соціально-економічні наслідки глобальної зміни клімату. *Академічні візії*. 2023. Вип. № 24. 9 с. URL: <https://academy-vision.org/index.php/av/article/download/627/633/641>
14. Heatwave. *World Meteorological Organization*. URL: <https://wmo.int/topics/heatwave>
15. Manual on the WMO Integrated Global Observing System. Annex VIII to the WMO Technical Regulations. *World Meteorological Organization*. 2023. 139 p. URL: https://amc.namem.gov.mn/wp-content/uploads/WMO/14.%20WMO-1160-2023-Upd-2024_en.pdf?t=1638837870
16. Настанова з метеорологічного прогнозування. *Український гідрометеорологічний центр (УкрГМЦ)*. Київ. 2019. 35 с. URL: https://www.meteo.gov.ua/f/pro_nas/normativni_akt/Nastanova%20z%20meteoprognozuvannia.pdf
17. The critical annual update revealing the latest trends in global carbon emissions. *Global Carbon Budget*. URL: <https://globalcarbonbudget.org/>
18. Gütschow J., Busch D., Pflüger M. The PRIMAP-hist national historical emissions time series (1750-2024) v2.7. *Zenodo*. 2025. URL: <https://zenodo.org/records/17090760> (дата звернення: 25.01.2026).
19. Trends in CO₂, CH₄, N₂O, SF₆. Carbon Cycle Greenhouse Gases. *Global Monitoring Laboratory. NOAA*. URL: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/data.html>
20. Greenhouse Gas Bulletin. *World Meteorological Organization*. URL: <https://wmo.int/publication-series/greenhouse-gas-bulletin>
21. Carbon Dioxide – Earth Indicator. *NASA*. URL: <https://science.nasa.gov/earth/explore/earth-indicators/carbon-dioxide/>
22. Methane – Earth Indicator. *NASA*. URL: <https://science.nasa.gov/earth/explore/earth-indicators/methane/>
23. The Intergovernmental Panel of Climate Change. IPCC. URL: <https://www.ipcc.ch/>

Дата першого надходження статті до видання: 16.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

ТРАНСФОРМАЦІЯ КЛІМАТИЧНОЇ ПОЛІТИКИ УКРАЇНИ В УМОВАХ ВІЙНИ ТА ЄВРОІНТЕГРАЦІЇ. ОЦІНЮВАННЯ КРІЗЬ ПРИЗМУ CLIMATE CHANGE PERFORMANCE INDEX

Матухно О.В.

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, м. Дніпро

Німецьке екологічне агентство (Umweltbundesamt)

Buchholzweg, 8, 13627, Berlin

matukhno.o.v@nmu.one

Актуальність дослідження обумовлена відсутністю повноцінного міжнародного оцінювання кліматичної політики України після 2022 року. Метою дослідження є оцінка потенційного впливу нової нормативно-правової бази та стратегічних документів на показники кліматичної політики України в відомих міжнародних рейтингах. Методологічну основу дослідження становить поєднання рейтингового підходу на основі аналізу динаміки показників Індексу ефективності зміни клімату (Climate Change Performance Index) до 2022 року із якісним аналізом національних стратегічних і нормативно-правових документів державної кліматичної, енергетичної та екологічної політики після 2022 року. Це дало змогу простежити зміни позиції України у міжнародному кліматичному оцінюванні до початку повномасштабної війни та визначити потенційний вплив нової нормативно-стратегічної бази на майбутній рейтинг України в категоріях національної та міжнародної кліматичної політики. Визначено, що поліпшення позицій України у категорії «Кліматична політика» в рейтингу Індексу ефективності зміни клімату у 2021-2022 роках було пов'язано з оновленням країною стратегічної рамки кліматичної політики. Водночас зазначено, що частина попередніх документів кліматичної політики України мала обмежену амбітність, оскільки не забезпечувала фактичного скорочення викидів порівняно з уже досягненим з 1990 року рівнем. Проаналізовано ключові документи 2022-2025 років, а також міжнародні звітні документи України в межах Рамкової конвенції ООН про зміну клімату. Визначено, що Україна формує нову архітектуру національної кліматичної політики, однак практична реалізація істотно ускладнюється воєнними ризиками, інституційними обмеженнями, економічними втратами та затримками у впровадженні окремих ринкових механізмів. Наукова новизна дослідження полягає у системному аналізі кліматичної політики України в період, коли країна не охоплюється міжнародними кліматичними рейтингами, а також у виявленні потенційного впливу нової нормативно-стратегічної бази на майбутні оцінки за методологією Індексу ефективності зміни клімату. Практичне значення полягає в можливості використання результатів дослідження для удосконалення стратегічного планування у сфері декарбонізації та адаптації до зміни клімату, а також для формування підходів до зеленої повоєнної відбудови. *Ключові слова:* кліматична політика, Україна, євроінтеграція, Індекс ефективності зміни клімату, нормативно-правова база, стратегічні документи

Transformation of Ukraine's Climate Policy in the Conditions of War and European Integration. Assessment through the Prism of the Climate Change Performance Index. Matukhno O.

The relevance of this study stems from the lack of a comprehensive international assessment of Ukraine's climate policy after 2022. The aim of the study is to evaluate the potential impact of the new regulatory framework and strategic documents on Ukraine's climate policy indicators in established international rankings. The methodological basis of the study is a combination of a ranking approach based on an analysis of the dynamics of the Climate Change Performance Index indicators up to 2022 with a qualitative analysis of national strategic and regulatory documents on state climate, energy, and environmental policy after 2022. This made it possible to track changes in Ukraine's position in international climate assessments prior to the start of the full-scale war and to determine the potential impact of the new regulatory and strategic framework on Ukraine's future ranking in the categories of national and international climate policy. It was determined that Ukraine's improved position in the «Climate Policy» category of the Climate Change Performance Index in 2021-2022 was linked to the country's update of its strategic climate policy framework. At the same time, it is noted that some of Ukraine's previous climate policy documents had limited ambition, as they did not ensure actual reductions in emissions compared to the levels already achieved since 1990. Key documents for 2022-2025, as well as Ukraine's international reporting documents under the UN Framework Convention on Climate Change, were analyzed. It was determined that Ukraine is forming a new architecture of national climate policy; however, practical implementation is significantly complicated by military risks, institutional constraints, economic losses, and delays in the introduction of certain market mechanisms. The scientific novelty of the study lies in a systematic analysis of Ukraine's climate policy during a period when the country is not covered by international climate rankings, as well as in identifying the potential impact of the new regulatory and strategic framework on future assessments using the Climate Change Performance Index methodology. The practical significance lies in the possibility of using the research results to improve strategic planning in the areas of decarbonization and climate change adaptation, as well as to develop approaches to green post-war reconstruction. *Key words:* climate policy, Ukraine, European integration, Climate Change Performance Index, regulatory framework, strategic documents



Постановка проблеми. 23 червня 2023 року Європейський Союз (ЄС) ухвалив рішення про надання Україні статусу кандидата на членство в ЄС. Євроінтеграція у сфері захисту довкілля є викликом для України на шляху до ЄС. Згідно з [1] Україні потрібно привести національну кліматичну та енергетичну політики у відповідність до європейських. Окрім того, на думку Європейської Комісії реформи в кліматичній політиці України також нерозривно пов'язано з зеленою відбудовою України під час та після війни. Кліматична політика ЄС динамічна, постійно вдосконалюється та набула суттєвих змін із ухваленням Європейського зеленого курсу. ЄС розробляє, вдосконалює, впроваджує значну кількість дій щодо захисту довкілля, сталого розвитку та боротьби зі змінами клімату. Прийняття Європейського кліматичного закону (ECL, Регламент (ЄС) 2021/1119) у 2021 році закріпило ціль нульових викидів та встановило кліматичну мету для 2030 року (скорочення викидів ПГ на 55%). Європейський зелений курс та Пакет «Fit for 55» спрямовані на створення кліматично нейтральної та сталої економіки [2].

Таким чином, Кліматичне законодавство ЄС вже давно вийшло за межі нормативно-правових актів, які існували під час підписання Угоди про асоціацію між Україною та ЄС, тому Україні потрібно врахувати у своїй кліматичній політиці та імплементувати не лише зобов'язання за Угодою, але й значну кількість актів (наприклад, Європейський кліматичний закон), керівних принципів, регламентів (наприклад, Регламент про Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM), інструментів (наприклад, Соціальний кліматичний фонд), які з'явилися після підписання Угоди. Кліматична стратегія України має відповідати кліматичній та енергетичній політиці ЄС та законодавчим актам в рамках пакету «Fit for 55». Україна має не лише привести національне природоохоронне законодавство, стратегії, політики та практики у відповідність до європейських, а також забезпечити їх ефективне впровадження. Для удосконалення стратегічного планування з метою трансформації кліматичної політики необхідно мати оцінки ефективності поточних заходів та мір. Допомагають оцінити ефективність кліматичної політики спеціально розроблені методики.

Актуальність дослідження. Існують різні методи оцінювання досягнень країн в кліматичній політиці, наприклад, Індекс ефективності зміни клімату (Climate Change Performance Index, CCPI), Монітор заходів щодо боротьби зі зміною клімату (Climate Action Tracker, CAT). Однак, через війну та відсутність повноцінних та релевантних даних Україна не охоплюється їх оцінками з 2022 року, при цьому, незважаючи на війну, країна активно розбудовує архітектуру національної кліматичної політики, а тому питання системного оцінювання прогресу України у сфері кліматичної політики в умовах

воєнного стану становить наукову прогалину, що потребує подальшого дослідження.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями полягає у тому, що дослідження спрямоване на оцінювання розвитку кліматичної політики України в умовах війни та Євроінтеграції, а його результати можуть бути використані в практиці державного управління, стратегічного планування та формування інструментів зеленої відбудови.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Кліматична політика стосується набору дій, нормативних актів, ініціатив і стратегій, механізмів, які впроваджуються урядами, міжнародними організаціями та іншими зацікавленими сторонами для вирішення проблеми зміни клімату та їх наслідків. Політика із запобігання змін клімату потребує урахування значних розбіжностей між країнами з різними рівнями доходів, природними ресурсами, індексом людського розвитку, між розвинутими країнами і країнами, що розвиваються [3-9].

Kovács et al. [10] зазначають, що при русі в напрямку Євроінтеграції спостерігається закономірність змін політичних цілей країн в сторону розв'язання екологічних та кліматичних проблем. Існує значна кількість робіт, що аналізують трансформацію екологічної політики окремих країн Центральної і Східної Європи під впливом вступу до ЄС [6, 11, 12, 13]. На думку означених авторів умови вступу в ЄС, а також потужна підтримка країн-кандидатів з боку ЄС через механізми фінансової та технічної допомоги були головними рушійними силами реформ екологічної та кліматичної політики країн-кандидатів. Сьогодні аналогічний шлях проходить Україна, але під додатковим пресингом російсько-української війни. Визнання проблеми змін клімату, що загострилися через російсько-українську війну, і виконання узятих Україною кліматичних зобов'язань (United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (1997), Kyoto Protocol (2004), Угода про Асоціацію з ЄС (2014), Національно Визначений Внесок (НВВ) (2015, 2021, 2025), Паризька угода (2016), участь у Європейському зеленому курсі (2020)) паралельно з виконанням вимог до країн-кандидатів призвели до необхідності формування нової кліматичної політики України, через що Україна запровадила значну кількість важливих стратегічних кроків у 2022-2025 роках. При цьому в науковій літературі недостатньо дослідженим залишається питання системного оцінювання трансформації кліматичної політики України починаючи з 2022 року.

Новизна статті. Наукова новизна полягає у системному аналізі кліматичної політики України в період, коли країна не охоплюється міжнародними рейтингами, та у визначенні, яким чином нова нормативна база може вплинути на майбутні оцінки України за категорією «Кліматична політика».

Методологічне або загальнонаукове значення полягає у застосуванні комплексного підходу до оцінювання кліматичної політики, який поєднує аналіз індикаторів ССРІ до 2022 року із якісним аналізом національних стратегічних і нормативно-правових документів державної кліматичної, енергетичної та екологічної політики після 2022 року. Загальнонаукове значення полягає у заповненні прогалини в дослідженні кліматичної політики України в період повномасштабної війни.

Методика дослідження: кабінетне дослідження (аналіз нормативно-правової бази, звітів, аналітичних та стратегічних документів, національних оглядів); метод аналізу (детальне вивчення зібраної інформації, її структурування); методи синтезу та класифікації; поєднання рейтингового підходу із якісним аналізом окремих документів.

Мета дослідження полягає в оцінюванні трансформації кліматичної політики України на основі аналізу динаміки показників ССРІ та стратегічних і нормативно-правових документів для визначення їх потенційного впливу на показники кліматичної політики країни.

Виклад основного матеріалу. ССРІ [14] є інструментом, що дозволяє оцінити прогрес та ефективність дій обраних для аналізу країн у питаннях запобігання змін клімату. Станом на 2026 рік ССРІ охоплює 63 країни та ЄС, на які приходить понад 90% світових викидів парникових газів. Показники рейтингу країн дозволяють оцінити та порівняти зусилля і прогрес країни в галузі боротьби зі змінами клімату, узяті кліматичні зобов'язання та успішність їх виконання. Рейтинг ґрунтується на загальному балі країни, що розраховується на основі 14 показників, які розділено на 4 категорії (рисунк 1): викиди парникових газів (GHG Emissions), відновлювальні джерела енергії (Renewable Energy), споживання енергії (Energy Use), кліматична політика (Climate Policy).

Для того аби врахувати відмінності у споживанні ресурсів та енергії і викидах парникових газів країнами з різною кількістю населення ССРІ розраховується у викидах парникових газів на душу населення. При цьому показники перших трьох категорій враховують «поточний рівень», «тренд за 5 попередніх років», «сумісність із метою – значно нижче 2°C

поточного рівня» та «сумісність із метою – значно нижче 2°C цілі країн до 2030 року». Така схема оцінювання дозволяє враховувати нещодавні зміни кліматичної політики країни та досягнення у зменшенні викидів парникових газів. Категорія «Кліматична політика» характеризується двома показниками, які вимірюють ефективність національної та міжнародної кліматичної політики.

Україна демонструвала середні показники в ССРІ перед початком повномасштабного вторгнення російської федерації (рис. 2, складено автором за даними [14]).

На діаграмі менше значення рангу означає кращий результат. Поліпшення позиції України в загальному рейтингу ССРІ у 2019-2022 рр. порівняно з 2007 та 2010 були пов'язані зі зменшенням показників у категорії «викиди парникових газів» через втрату через окупацію частини українських територій з розвинутою промисловою структурою з 2014 року, а не з амбітною та успішною кліматичною або енергетичною політикою.

Автори методики ССРІ зазначають, що виконати аналіз слабких сторін країни можна лише в межах окремих категорій та показників. Ми зосередимося на аналізі результатів за категорією «Кліматична політика», тому що згідно до методики ССРІ ефективність реалізації цієї категорії впливає на показники категорій «Відновлювальна енергія», «Використання енергії» та в підсумку на категорію «Викиди парникових газів». Категорія «Кліматична політика» також суттєво впливає на короткострокові зміни у рейтингу ССРІ: позитивні зміни у кліматичній політиці дозволяють країнам швидко підійматися на більш високі позиції.

Категорія «Кліматична політика» характеризується двома показниками, які вимірюють ефективність національної та міжнародної кліматичної політики. Показник «Національна кліматична політика» охоплює політики щодо розвитку відновлюваних джерел енергії, підвищення енергоефективності та інших заходів щодо скорочення викидів парникових газів у промисловому, транспортному та житловому секторах, також оцінюються показники підтримки та захисту біорізноманіття лісових екосистем, охорони торфовищ, скорочення процесів збезліснення; амбітність Національно Визначеного Внеску країни,

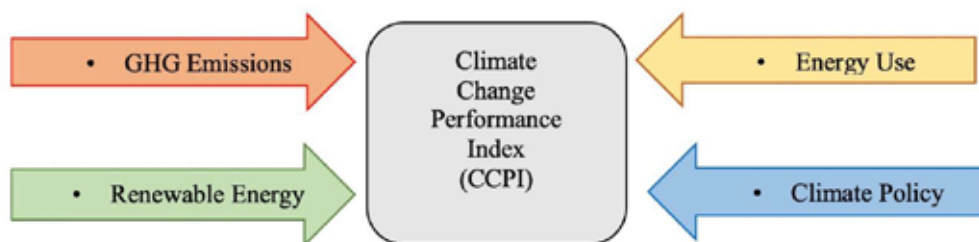


Рис. 1. Структура ССРІ

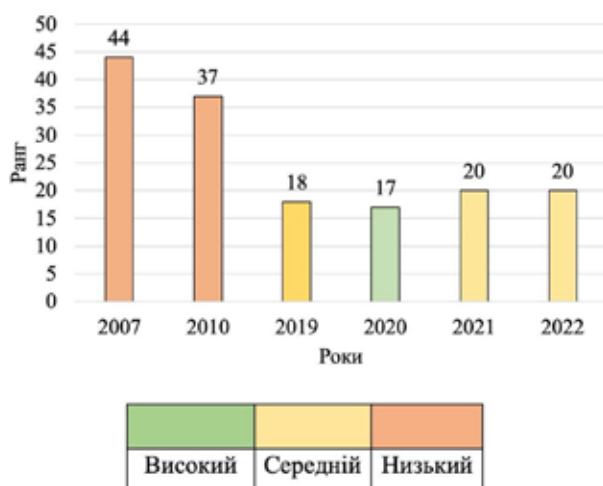


Рис. 2. Динаміка змін місця України в рейтингу Індексу ефективності зміни клімату (CCPI)

його співставність з метою недопущення зростання глобальної середньої температури більше 2°C і прогрес у досягненні зазначених цілей. Показник «Міжнародна кліматична політика» оцінює діяльність країн на міжнародних конференціях, форумах та у багатосторонніх угодах. Категорія «Кліматична політика» оцінюється експертами з кліматичної та енергетичної політик з використанням комплексного опитувальника. Рейтинг України за категорією «Кліматична політика» наведено у таблиці 1 (складено автором за базою даних [14]).

Слід зазначити, що низка документів кліматичної політики України, сформованих до 2021 року, мала суттєві недоліки. Так, перший Національно визначений внесок України (2015 рік) передбачав скорочення викидів парникових газів до 2030 року до 60% від рівня 1990 року, хоча вже станом на 2016 рік сумарні викиди скоротилися приблизно до 36% від цього рівня. Така динаміка була зумовлена значним скороченням кількості викидів парникових газів після 1990 року через розпад СРСР і колапс ринків, на які орієнтувалася національна економіка, також через окупацію територій Донецької, Луганської областей та Криму, де залишилась частина підприємства важкої промисловості, більшість з яких припинили свою роботу. Отже, перший НВВ фактично не вимагав додаткового скорочення викидів,

а допускав їх зростання порівняно з фактичним рівнем. Сценарії викидів парникових газів розглянуті у «Стратегії низьковуглецевого розвитку України на період до 2050» (2018 рік) також дозволяли зберегти викиди на поточному рівні або навіть збільшити їх (за оптимістичним сценарієм у 2050 р. викиди парникових газів мали становити 31% від рівня 1990 р.). Це базувалося на очікуваннях відновлення та росту економіки до 2030 року через потенційне відновлення територіальної цілісності країни та економіки. Окрім того, кліматична політика була фрагментарна, недостатньо інтегрована в усі галузі економіки, часто була відсутня практична реалізація наявних на папері документів (Законів, Стратегій, Планів та ін.).

Поліпшення позиції України в категорії Національної кліматичної політики у рейтингу в 2021-2022 років можна пов'язати із оновленням стратегічної рамки кліматичної політики: оновленням Національно визначеним внеском, який зафіксував ціль скорочення викидів на 65% до 2030 року від рівня 1990 року; схваленням «Стратегії екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату до 2030 року» (першого стратегічного національного документа з адаптації) [15], де викладено підходи до адаптації до наслідків зміни клімату та підвищення стійкості в різних секторах, прописано включення заходів з екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату в національні, регіональні стратегії, плани управління річковими басейнами; схваленням «Концепції Державної цільової програми справедливої трансформації вугільних регіонів України на період до 2030 року» [16], метою якої є забезпечення переходу до кліматично нейтральної економіки через зменшення видобутку викопного палива та скорочення обсягів викидів парникових газів. Показник національної кліматичної політики прямо враховує амбітність НВВ і прогрес у його досягненні, а міжнародна кліматична політика – позицію та діяльність країни в межах Рамкової конвенції ООН про зміну клімату (UNFCCC), зокрема, участь у переговорах, подання НВВ, звітність та підтримку міжнародних кліматичних зобов'язань. Таким чином, позитивна динаміка 2021-2022 років була пов'язана із посиленням стратегічного та міжнародного виміру кліматичної політики України. Разом з тим, подальший її розвиток в умовах повномасштабної війни потребує окремого аналізу, оскільки ряд документів, ухвалених після

Таблиця 1

Показники кліматичної політики України в рейтингу CCPI

Рік	Ранг	Загальна оцінка (зважена та округлена)	Загальний рейтинг	Національна кліматична політика	Міжнародна кліматична політика
2019	40	43,8	Низька	Дуже низька	Середня
2020	49	30,6	Низька	Дуже низька	Низька
2021	46	6,32	Низька	Низька	Низька
2022	41	7,68	Низька	Низька	Низька

2022 року мають позитивно вплинути на показники кліматичної політики України в рейтингу ССРІ.

У 2022-2025 роках було сформовано нову нормативно-стратегічну основу кліматичної політики, зокрема:

- ухвалено «Енергетичну стратегію України до 2050 року» [17], яка відображає цілі європейського «зеленого курсу» та базується на принципах комплексного підходу до формування та реалізації політики у сфері енергетики, створення умов для сталого розвитку економіки України, і одночасно передбачає досягнення Україною вуглецевої нейтральності енергетичного сектору до 2050 року. Енергетична стратегія передбачає кілька сценаріїв розвитку безпеки та економіки, які залежать від термінів закінчення війни, темпів зростання ВВП, демографічної ситуації та інтеграції України до Європейського Союзу;

- «Національний план дій з розвитку відновлювальної енергетики до 2030 року» [18], яким передбачається, що частка енергії з відновлюваних джерел до 2030 року в Україні має зрости до 25%. Середнє виробництво електроенергії відновлювальними джерелами по ЄС – 39% [19]. Для довідки: загальна частка відновлюваних джерел енергії станом на кінець 2020 року складала – 9,2 % від загальної генерації по Україні [18]. На початок 2023 року через війну Україною втрачено 90% вітрової та 50% сонячної генерації [20];

- Закон України «Про основні засади державної кліматичної політики» [21], який зафіксував на державному рівні кліматичну архітектуру, принципи кліматичної політики, рух до низьковуглецевого розвитку та кліматичної нейтральності, заходи з адаптації до змін клімату;

- розпорядження Кабінету Міністрів України «Про схвалення Стратегії формування та реалізації державної політики у сфері зміни клімату на період до 2035 року» разом з Операційним планом [22], метою якої є формування цілісної та послідовної державної політики у сфері зміни клімату та низьковуглецевого розвитку, в тому числі під час повноцінної відбудови України з дотриманням концепції Build Back Better та Build Back Greener;

- «Національний план з енергетики та клімату України 2025-2030» (НПЕК) [23], в процесі оновлення у 2026 році, який має об'єднати та інтегрувати стратегії різних міністерств (Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів, Міністерства енергетики, Міністерства економіки, Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України та інших) і наявність та реалізація котрого є вимогою ЄС. У НПЕК серед запланованих політик та заходів з декарбонізації визначено реформу податку на викиди двоокису вуглецю та впровадження Системи Торгівлі Викидами (СТВ);

- «Довгострокова стратегія низьковуглецевого розвитку України» [24], яка має стати основою для розбудови України після війни.

Крім того, Україна продовжила виконання міжнародних кліматичних зобов'язань шляхом подання Adaptation Communication [25] і Biennial Transparency Report [26]. Водночас, другий НВВ України (2025) (попри його важливість як рамки зеленої відбудови та узгодження кліматичної політики з ціллю кліматичної нейтральності до 2050 року) не можна розглядати як посилення амбітності, оскільки, порівняно з оновленим НВВ 2021 року, він переносить досягнення рівня скорочення викидів понад 65% від рівня 1990 року з 2030 року на 2035 рік.

Як можна зазначити з наведеного аналізу нових елементів кліматичної політики України, незважаючи на війну формується більш амбіційна кліматична політика заснована на європейських принципах та підходах. На розвиток кліматичної політики України впливає прагнення країни до узгодження екологічної політики з вимогами ЄС, особливо після отримання статусу країни-кандидата на вступ до ЄС. Автор вважає, що показники країни за категорією «Кліматична політика» у 2023-2025 роках мали б поліпшитися за умови відновлення оцінювання.

Обговорення результатів дослідження. До війни Україна демонструвала відсутність швидкого прогресу у розвитку кліматичної політики. На рейтинг країни впливала низька ефективність національної та міжнародної кліматичної політики (таблиця 1). Динаміка зниження викидів парникових газів пов'язана не з вдалим впровадженням амбітної кліматичної політики, а зі зменшенням потужностей виробництва після 1991 року. Причинами неефективної національної кліматичної політики є:

- економічний розвиток країни та геополітична нестабільність;

- відсутність дієвих економічних механізмів і інструментів реалізації кліматичної політики;

- відсутність інструментів державної фінансової підтримки суб'єктів господарювання для впровадження заходів, спрямованих на пом'якшення зміни клімату;

- недостатня інтеграція кліматичних питань в усі галузі економіки та до галузевих політик. Відсутність узгодженості галузевих політик, стратегій, планів з цілями державної кліматичної політики та документами кліматичного планування;

- недосконалість національної законодавчої та іншої нормативно-правової бази у сфері зміни клімату. Відсутність системного підходу, уривчастість та ізольованість законодавчих рішень щодо змін клімату в різних галузях економіки;

- неузгодженість законодавчих та інших нормативно-правових актів у соціально-економічних сферах із цілями та завданнями кліматичної політики;

- недостатнє вертикальне співробітництво між центральними та місцевими органами виконавчої влади, органами місцевого самоврядування щодо формування і реалізації складових державної кліматичної політики відповідно до їх компетенції;

– низька інституційна спроможність системи державного управління. Відсутність чіткої системи екологічного управління на різних рівнях влади не дозволяє ефективно реалізовувати законодавчі акти на рівні місцевої влади. Підготовка та схвалення документів (законів, стратегій, планів) може тривати роками, а реалізація роками відтерміновуватися. Документи можуть бути відірвані від реальності і не мати практичної реалізації після прийняття;

– низька залученість наукової та академічної спільноти до формування державної кліматичної політики;

– низький рівень усвідомленості кліматичної проблематики бізнесом, органами місцевого самоврядування та громадянами.

Україна має амбітні плани щодо розвитку кліматичної політики, але продовження війни, економічний спад, руйнування інфраструктури, значна децентралізація та низька ефективність екологічного управління можуть негативно вплинути на реалізацію цих планів. Так, наприклад, формування правової бази для запровадження Системи Торгівлі Викидами (СТВ) вже тривалий час залишається лише на рівні стратегічного планування та підготовки проєктів нормативно-правових актів, тоді як окремий закон станом на березень 2026 року не ухвалено, що пояснюється поєднанням технічних, інституційних та воєнних факторів: в умовах війни держава була змушена спочатку відтермінувати, а потім відновити

систему моніторингу, звітності, верифікації; адаптувати регулювання до частково зруйнованих установок, або установок, що знаходяться на окупованих територіях; сформувати інституційну й технічну основу майбутньої СТВ, узгодженої з вимогами ЄС.

Висновки.

Україна під час євроінтеграції має узяти за приклад досвід передових країн ЄС з узгодження національної кліматичної політики з кліматичними цілями ЄС. Для реалізації поставлених кліматичних цілей Україна після набуття статусу країни-кандидата може використовувати фінансову підтримку зі спеціалізованих фондів, як це роблять Польща та Туреччина. Україна має впровадити європейські інструменти кліматичної політики (наприклад, СТВ) для наповнення власних фондів, наприклад, Державного фонду декарбонізації та енергоефективної трансформації. Для виконання Україною своїх міжнародних зобов'язань щодо зміни клімату, їй необхідно розробити та реалізувати плани, які включають координацію дій місцевих, регіональних та національних суб'єктів з різних секторів.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати дослідження можуть бути використані як основа для подальшого аналізу кліматичної політики України та у практиці державного управління для розробки стратегічних документів при плануванні зеленої повоєнної відбудови України.

Література

1. SWD (2023) 699 final. Ukraine 2023 Report. European Commission. URL: https://neighbourhood-enlargement.ec.europa.eu/document/download/bb61ea6d-dda6-4117-9347-a7191ecef3f_en?filename=SWD_2023_699%20Ukraine%20report.pdf (дата звернення: 26.03.2026)
2. European Green Deal. European Council. 2019. URL: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal> (дата звернення: 26.03.2026)
3. Chandler W., Schaeffer R., Dadi Z., Shukla P.R., Tudela F., Davidson O., Alpan-Atamer S. Climate change mitigation in developing countries. Brazil, China, Mexico, South Africa, and Turkey. *Pew Center on Global Climate Change*. 2002. URL: <https://www.c2es.org/document/climate-change-mitigation-in-developing-countries-brazil-china-india-mexico-south-africa-and-turkey> (дата звернення: 26.03.2026)
4. Sudhakara R. B., Assenza G. B. Climate Change – a Developing Country Perspective. *Current Science*. 2009. Vol. 97, № 1, P. 50-62. URL: <http://www.jstor.org/stable/24112082> (дата звернення: 26.03.2026)
5. Bhattacharya A., Kharas H., W.McArthur J. Developing countries are key to climate action. COMMENTARY. 2023. URL: <https://www.brookings.edu/articles/developing-countries-are-key-to-climate-action/> (дата звернення: 26.03.2026)
6. Buzogány, A., Cotta, B. Post-accession backsliding and European Union environmental policies. *Post-Communist Economies*. 2022. Vol. 34, № 5, P. 647-665. DOI: 10.1080/14631377.2021.1965361
7. Babette N., Joachim B. Comparing the Climate Policy Performance of Emerging Economies. *World Development*. 2014. Vol. 59, P. 1-15. DOI: 10.1016/j.worlddev.2014.01.016
8. Falkner R. Weaponised Energy and Climate Change: Assessing Europe's Response to the Ukraine War. *LSE Public Policy Review*. 2023. URL: <https://ppr.lse.ac.uk/articles/10.31389/lseppr.78> (дата звернення: 26.03.2026)
9. Matukhno O., Stanytsina V., Dobrovolska O. & Artemchuk V. An Exploratory Protocol for Sustainability-Oriented Cross-Index Assessment of National Climate Policy Effectiveness. 24 с. (Препринт. *Sustainability*). DOI: 10.20944/preprints202603.1814.v1.
10. Kovács A.D., Farkas J. Z., Vasáros G. L., Balla D., Kiss E. Climate policy contradictions in light of the policy paradigms – the case of the Visegrád Countries. *Environmental Science & Policy*. 2024, Vol. 154. DOI: 10.1016/j.envsci.2024.103689
11. Andonova L. *The europeanization of environmental policy in central and Eastern Europe. The Europeanization of Central and Eastern Europe* / За ред. Schimmelfennig & U. Sedelmeier. Cornell University Press. Cornell Studies in Political Economy, 2005. P. 135–156 URL: <https://cadmus.eui.eu/handle/1814/2860> (дата звернення: 26.03.2026)
12. Koutalakis C., Buzogány A., Börzel T. A. (2010). When soft regulation is not enough: The integrated pollution prevention and control directive of the European Union. *Regulation & Governance*. 2010, Vol. 4, № 3, P. 329-344. DOI: 10.1111/j.1748-5991.2010.01084.x

13. Christiansen A. C., Tangen K. The shadow of the past: Environmental Issues and institutional learning in EU enlargement processes. *Journal of Environmental Policy & Planning*. 2002, Vol. 4, № 1, P. 67–86. DOI: 10.1002/jepp.97
14. Climate Change Performance Index: веб-сайт. URL: <https://ccpi.org> (дата звернення: 26.03.2026)
15. Стратегія екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату до 2030 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 20 жовтня 2021 р. № 1363-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1363-2021-r#Text> (дата звернення: 26.03.2026)
16. Концепції Державної цільової програми справедливої трансформації вугільних регіонів України на період до 2030 року: Постанова Кабінету Міністрів України від 22 вересня 2021 року № 1024. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1024-2021-p#n11> (дата звернення: 26.03.2026)
17. Енергетична стратегія України до 2050 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 21 квітня 2023 року № 373-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-p#Text> (дата звернення: 26.03.2026)
18. Національний план дій з розвитку відновлювальної енергетики до 2030 року: Затверджено Кабінетом Міністрів України від 13 серпня 2026 р. № 761-р. URL: <https://me.gov.ua/Documents/Detail?lang=uk-UA&id=17f558a7-b4b4-42ca-b662-2811f42d4a33&title=NatsionalniiPlanZEnergetikiTaKlimatuNaPeriodDo2030-Roku> (дата звернення: 26.03.2026)
19. Ukraine. Country summary. CAT: веб-сайт. 2021. URL: <https://climateactiontracker.org/countries/ukraine/2021-12-13/> (дата звернення: 26.03.2026)
20. Через війну в Україні 90% потужностей вітрової енергетики виведені з експлуатації. *Укрінформ*: веб-сайт. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3599368-cerez-vijnu-v-ukraini-90-potuznostej-vitrovoi-energetiki-vivedeni-z-ekspluatacii-galusenko.html> (дата звернення: 26.03.2026)
21. Про основні засади державної кліматичної політики: Закон України від 08.10.2024 № 3992-IX. *Відомості Верховної Ради*. 2025, № 9, ст. 19. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3991-20#Text> (дата звернення: 26.03.2026)
22. Стратегія формування та реалізації державної політики у сфері зміни клімату на період до 2035 року. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 30 травня 2024 р. № 483-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/483-2024-%D1%80#Text> (дата звернення: 26.03.2026)
23. Національний план з енергетики та клімату України на період до 2030 року. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 25 червня 2024 р. № 587-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/587-2024-%D1%80#Text>; <https://me.gov.ua/Documents/Detail?lang=uk-UA&id=17f558a7-b4b4-42ca-b662-2811f42d4a33&title=NatsionalniiPlanZEnergetikiTaKlimatuNaPeriodDo2030-Roku> (дата звернення: 26.03.2026)
24. Довгострокова стратегія низьковуглецевого розвитку України. Міністерство економіки, довкілля та сільського господарства України, грудень 2025. URL: <https://me.gov.ua/download/ba4565a8-544b-4c90-af84-49b2b718f629/file.pdf> (дата звернення: 26.03.2026)
25. Adaptation Communication. Ukraine Submission – 1. *United Nations Climate Change*. URL: <https://unfccc.int/documents/646666> (дата звернення: 26.03.2026)
26. Ukraine. Biennial Transparency Report (BTR). BTR1. *United Nations Climate Change*. URL: <https://unfccc.int/documents/650960> (дата звернення: 26.03.2026)

Дата першого надходження статті до видання: 31.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

МОНІТОРИНГ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН ЗА НАСЛІДКАМИ ЗАБРУДНЕННЯ НЕОРГАНІЧНИМИ РЕЧОВИНАМИ РІЧКИ ПІВДЕННИЙ БУГ

Совгіра С.В., Кочубей О.В., Душечкіна Н.Ю.

Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини

вул. Садова, 2, 20300, м. Умань

sovgirasvitlana@gmail.com, sncelena@gmail.com, nataxeta74@gmail.com

У статті досліджено проблеми впливу кліматичних змін і забруднення неорганічними речовинами на екологічний стан річки Південний Буг у межах Центрального Побужжя. Актуальність теми зумовлена посиленням кліматичних змін, які впливають на гідрологічний режим річок, зниження водності, зміну умов самоочищення водних екосистем і, як наслідок, погіршення якості поверхневих вод. Особливу увагу приділено ролі неорганічних речовин як індикаторів трансформації гідрохімічного стану річки в умовах поєднаної дії природних і антропогенних чинників. Метою дослідження є оцінка сучасного екологічного стану річки Південний Буг за показниками неорганічного забруднення та виявлення основних тенденцій його впливу в умовах кліматичних змін. У статті використано дані державного моніторингу поверхневих вод за 2025 рік і січень 2026 року. Аналіз проведено на території Центрального Побужжя, що охоплює середню течію річки Південний Буг у межах Хмельницької та Вінницької областей. Установлено, що екологічний стан досліджуваної ділянки річки є нестійким і характеризується коливаннями вмісту амоній-іонів, нітрат-іонів, нітрит-іонів, фосфат-іонів, а також сухого залишку. Виявлено зростання максимальних значень нітратів і мінералізації води упродовж другої половини 2025 року та збереження високого вмісту нітрат-іонів у січні 2026 року. Зафіксовано окремі випадки перевищення нормативних значень за вмістом кадмію, свинцю, ртуті та окремих пестицидів, що свідчить про наявність локальних осередків хімічного забруднення. Найбільш уразливими є ділянки, пов'язані з урбанізованими територіями та зонами господарського освоєння.

Обґрунтовано, що поєднання кліматичних змін і антропогенного навантаження є визначальним чинником погіршення якості поверхневих вод річки Південний Буг. Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості їх використання для вдосконалення системи екологічного моніторингу, прогнозування змін стану водних екосистем та обґрунтування природоохоронних заходів у межах Центрального Побужжя. **Ключові слова:** кліматичні зміни; поверхневі води; екологічний стан; річка Південний Буг; Центральне Побужжя; неорганічні речовини; забруднення вод; екологічний моніторинг; антропогенне навантаження; екологічна безпека.

Climate change monitoring due to inorganic substances pollution of the Southern Bug river. Sovhira S., Kochubei O., Dushechkina N.

The article examines the problems of the impact of climate change and pollution by inorganic substances on the ecological state of the Southern Bug River within the Central Bug Region. The relevance of the topic is due to the intensification of climate change, which affects the hydrological regime of rivers, reducing water content, changing the conditions for self-purification of aquatic ecosystems and, as a result, deteriorating the quality of surface waters. Particular attention is paid to the role of inorganic substances as indicators of the transformation of the hydrochemical state of the river under the combined action of natural and anthropogenic factors. The purpose of the study is to assess the current ecological state of the Southern Bug River in terms of inorganic pollution indicators and identifying the main trends of its impact under climate change conditions. The article uses data from state monitoring of surface waters for 2025 and January 2026. The analysis was conducted on the territory of the Central Bug Region, which covers the middle reaches of the Southern Bug River within the Khmelnytskyi and Vinnytsia regions. It was established that the ecological state of the studied section of the river is unstable and is characterized by fluctuations in the content of ammonium ions, nitrate ions, nitrite ions, phosphate ions, as well as dry residue. An increase in the maximum significant nitrates and water mineralization during the second half of 2025 and the preservation of a high content of nitrate ions in January 2026 were detected. Individual cases of exceeding the regulatory values for the content of cadmium, lead, mercury and certain pesticides were recorded, which indicates the presence of local foci of chemical pollution. The most vulnerable are areas associated with urbanized territories and economic development zones. It is substantiated that the combination of climate change and anthropogenic load is a determining factor in the deterioration of the quality of surface waters of the Southern Bug River. The practical significance of the results obtained lies in the possibility of their use for improving the ecological monitoring system, predicting changes in the state of aquatic ecosystems and substantiating environmental protection measures within the Central Bug region. **Key words:** climate change; surface water; ecological state; Southern Bug River; Central Bug region; inorganic substances; water pollution; ecological monitoring; anthropogenic load; ecological safety.

Постановка проблеми. В умовах сучасних кліматичних змін проблема збереження екологічного стану поверхневих вод є особливо актуальною.

Підвищення температури повітря, зміна режиму опадів, зменшення водності річок і зростання частоти екстремальних явищ впливають на гідрологіч-



ний режим, процеси самоочищення водних екосистем і концентрацію забруднювальних речовин у воді. За таких умов якість поверхневих вод визначається не лише антропогенним навантаженням, а й кліматично зумовленими змінами природних процесів.

Річка Південний Буг має важливе природоохоронне та господарське значення, проте її басейн зазнає суттєвого антропогенного впливу, а також негативних наслідків кліматичних змін. Особливу небезпеку становить забруднення неорганічними речовинами, зокрема сполуками азоту, фосфору та мінеральними солями, концентрація яких може зростати внаслідок зменшення стоку та підвищення температури води [8; 13].

Нормативну основу для оцінювання стану поверхневих вод в Україні становлять Водний кодекс України, Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища», Порядок здійснення державного моніторингу вод, Методика віднесення масивів поверхневих вод до класів екологічного та хімічного стану, а також Водна стратегія України до 2050 року [1; 3–6]. Разом із тим територія басейну Південного Бугу залишається недостатньо дослідженою в аспекті комплексної оцінки впливу кліматичних змін на екологічний стан річки за показниками забруднення неорганічними речовинами.

Отже, проблема полягає у необхідності комплексного моніторингу та оцінки впливу кліматичних змін і забруднення неорганічними речовинами на екологічний стан річки Південний Буг для своєчасного виявлення екологічних ризиків і обґрунтування природоохоронних заходів.

Актуальність дослідження. Поверхневі води є важливим природним ресурсом, від якого залежить екологічна безпека, водозабезпечення населення та розвиток господарського комплексу. В умовах посилення кліматичних змін і зростання антропогенного навантаження особливої актуальності набуває проблема погіршення якості річкових вод через забруднення неорганічними речовинами. Для річки Південний Буг це питання є особливо важливим, оскільки зміни гідрологічного режиму, зниження водності та забруднення негативно впливають на її екологічний стан. Тому актуальним є дослідження впливу кліматичних змін і забруднення неорганічними речовинами на стан річки Південний Буг, що потребує своєчасного виявлення екологічних ризиків з метою обґрунтування природоохоронних заходів.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Авторський доробок безпосередньо пов'язаний із розв'язанням актуальних наукових і практичних завдань у галузі екологічної безпеки, охорони поверхневих вод, раціонального природокористування та адаптації водогосподарського комплексу до змін клімату. Дослідження спрямоване на виявлення закономірностей впливу кліматичних змін і забруднення неор-

ганічними речовинами на екологічний стан річки Південний Буг, що відповідає сучасним напрямкам розвитку екологічного моніторингу та басейнового управління водними ресурсами.

Наукове значення авторського доробку полягає у поглибленні підходів до оцінювання екологічного стану поверхневих вод за умов поєднаної дії природних і антропогенних чинників. Отримані результати дають змогу уточнити уявлення про вплив температурних змін, режиму атмосферних опадів, коливань водності та вмісту неорганічних речовин на формування якості річкових вод. Це створює підґрунтя для подальшого застосування сучасних підходів до комплексного аналізу стану гідроекосистем та прогнозування їх змін у часі.

Практичне значення роботи полягає в можливості використання отриманих результатів під час здійснення державного моніторингу вод, екологічної оцінки якості поверхневих вод, підготовки природоохоронних заходів і прийняття управлінських рішень у межах басейну річки Південний Буг. Результати дослідження можуть бути застосовані для виявлення екологічних ризиків, обґрунтування заходів щодо зниження рівня забруднення, удосконалення системи спостережень за станом річкових вод, а також для інформаційного забезпечення регіональних програм охорони водних ресурсів.

Отже, авторський доробок має тісний зв'язок із важливими науковими завданнями у сфері дослідження впливу кліматичних змін на водні екосистеми та з практичними завданнями забезпечення екологічно безпечного функціонування водогосподарських систем, збереження якості водних ресурсів і підвищення ефективності басейнового управління.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання впливу кліматичних змін на якість поверхневих вод активно досліджується як в Україні, так і за кордоном.

У вітчизняних дослідженнях важливе місце посідають праці І. Шахман та А. Бистрянцевої, у яких здійснено інтегральну оцінку якості води річки Південний Буг і обґрунтовано доцільність використання комплексних показників для аналізу її екологічного стану в умовах змінення клімату [7; 14].

Серед вітчизняних досліджень важливе місце посідають праці, присвячені оцінці якості води річки Південний Буг. У роботах І. Шахман та А. Бистрянцевої здійснено інтегральну оцінку якості води річки Південний Буг і обґрунтовано доцільність використання комплексних показників для аналізу її екологічного стану в умовах змін клімату [7; 14]. У дослідженні S. Snizhko та ін. розглянуто сучасні виклики водної безпеки басейну Південного Бугу, зокрема в контексті кліматичних змін і перспектив управління водними ресурсами [15].

Міжнародні дослідження І. Delpla [9], М. Е. Abalasei [8], D. Y. Dorado-Guerra [10], C. M. Richardson [12] та S. Santy [13] свідчать, що під-

вищення температури повітря, зміна режиму атмосферних опадів, зниження водності річок і зростання частоти екстремальних гідрометеорологічних явищ істотно впливають на гідрохімічний режим водних об'єктів, сприяють підвищенню концентрації забруднювальних речовин і погіршенню екологічного стану гідроекосистем. Показано, що в умовах потепління та зменшення стоку зростає ризик накопичення у воді неорганічних сполук, насамперед азоту і фосфору, що негативно позначається на екологічному стані річкових систем [13].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Незважаючи на наявність праць, присвячених оцінці якості води річки Південний Буг і впливу кліматичних змін на водні ресурси, недостатньо дослідженим залишається вплив кліматичних чинників і забруднення неорганічними речовинами на екологічний стан річки. Недостатньо висвітлено також використання показників неорганічного забруднення як індикаторів наслідків кліматичних змін у системі екологічного моніторингу. Саме ці питання становлять предмет даного дослідження.

Новизна дослідження полягає у комплексній оцінці впливу кліматичних змін і забруднення неорганічними речовинами на екологічний стан річки Південний Буг. У роботі поглиблено підхід до використання показників неорганічного забруднення як індикаторів наслідків кліматичних змін у системі екологічного моніторингу поверхневих вод. Це дає змогу більш повно оцінити сучасний стан річки та виявити основні екологічні ризики.

Методологічне або загальнонаукове значення полягає у застосуванні комплексного підходу до оцінки екологічного стану річки Південний Буг з урахуванням кліматичних змін і забруднення неорганічними речовинами. Отримані результати поглиблюють уявлення про взаємозв'язок між гідрометеорологічними та гідрохімічними показниками поверхневих вод.

Виклад основного матеріалу. Дослідження виконано на території Центрального Побужжя, що охоплює середню течію річки Південний Буг

у межах Хмельницької та Вінницької областей. Саме ця частина басейну є показовою для оцінки впливу кліматичних змін і забруднення неорганічними речовинами, оскільки знаходяться урбанізовані території, здійснюється сільськогосподарське використання водозбору та суттєве антропогенне навантаження на річкову систему. Для аналізу обрано 3 пункти спостереження у межах Центрального Побужжя: м. Хмільник, м. Вінниця та ділянка нижче м. Вінниця. Такий вибір дає змогу простежити зміни якості води вздовж середньої течії річки та виявити найбільш характерні тенденції.

Упродовж 2025 року та у січні 2026 року в досліджуваних пунктах оцінювалися показники, що характеризують органічне та неорганічне забруднення води, зокрема БСК5, ХСК, амоній-іони, нітрат-іони, нітрит-іони, фосфат-іони та сухий залишок. Узагальнені межі коливань цих показників у межах Центрального Побужжя наведено в (таблиці 1.)

Аналіз таблиці показав, що у межах Центрального Побужжя впродовж 2025 року спостерігалася значна мінливість гідрохімічних показників. Найбільші коливання виявлено за вмістом нітрат-іонів, фосфат-іонів і сухого залишку, що свідчить про нестійкий екологічний стан досліджуваної ділянки річки. У січні 2026 року відзначено деяке зниження максимальних значень БСК5, ХСК та фосфатів, проте високі концентрації нітратів і підвищений сухий залишок зберігалися.

Упродовж 2025 року та у січні 2026 року в межах Центрального Побужжя простежувалася мінливість основних гідрохімічних показників, що характеризують органічне й неорганічне навантаження на річку. Узагальнені сезонні зміни цих показників наведено в таблиці 2. Аналіз таблиці 2, засвідчив що у другій половині 2025 року найбільші коливання спостерігалися за вмістом нітрат-іонів, фосфат-іонів і сухого залишку. У січні 2026 року зафіксовано зуження діапазону БСК5, ХСК, амоній-іонів і фосфат-іонів, проте підвищений вміст нітратів і високі значення сухого залишку зберігалися, що свідчить про стійкість мінералізаційного та біогенного навантаження на водне середовище.

Таблиця 1

Діапазон окремих показників якості води річки Південний Буг у межах Центрального Побужжя у 2025 році та січні 2026 року

Показник	2025 рік	Січень 2026 року
БСК5, мгО/дм ³	0,95–8,20	1,01–5,80
ХСК, мгО/дм ³	15,79–65,00	16,80–48,78
Амоній-іони, мг/дм ³	0,00–1,20	0,05–0,28
Фосфат-іони, мг/дм ³	0,05–3,91	0,20–1,17
Нітрат-іони, мг/дм ³	0,00–15,71	2,25–15,68
Нітрит-іони, мг/дм ³	0,00–0,61	0,02–0,26
Сухий залишок, мг/дм ³	353–1844	487–1686

Таблиця 2

Динаміка окремих показників якості води річки Південний Буг у межах Центрального Побужжя у 2025 році та січні 2026 року

Показник	Липень 2025	Серпень 2025	Вересень 2025	Листопад 2025	Грудень 2025	Січень 2026
БСК5, мгО/дм ³	0,7–8,2	0,95–7,6	1,9–7,8	1,13–7,2	1,06–8,1	1,01–5,80
ХСК, мгО/дм ³	26,92–56,0	15,79–65,0	16,10–62,0	19,0–58,0	27,70–52,58	16,80–48,78
Амоній-іони, мг/дм ³	0,00–0,54	0,00–0,22	0,05–0,38	0,06–1,20	0,07–0,56	0,05–0,28
Фосфат-іони, мг/дм ³	0,08–3,91	0,14–2,40	0,05–2,13	0,17–1,88	0,18–1,50	0,20–1,17
Нітрат-іони, мг/дм ³	0,00–3,78	0,01–3,40	0,00–4,50	0,00–6,74	0,77–15,71	2,25–15,68
Нітрит-іони, мг/дм ³	0,01–0,61	0,01–0,21	0,00–0,21	0,01–0,23	0,04–0,25	0,02–0,26
Сухий залишок, мг/дм ³	446–1690	353–1757	363–1693	416–1668	461–1844	487–1686

Таблиця 3

Перевищення окремих показників якості води у межах Центрального Побужжя у 2025 році та січні 2026 року

Період	Пункт спостереження	Показник	Фактичне значення	Нормативне значення
Липень 2025	р. Південний Буг, 607 км, нижче с. Гущинці	Кадмій	13,949 мкг/дм ³	1,0 мкг/дм ³
Липень 2025	р. Південний Буг, 582 км, Сабарівське водосховище, питний водозабір м. Вінниці	Кадмій	4,758 мкг/дм ³	1,0 мкг/дм ³
Липень 2025	р. Південний Буг, 582 км, Сабарівське водосховище	Свинець	36,198 мкг/дм ³	30,0 мкг/дм ³
Вересень 2025	р. Жердь, 16 км, м. Калинівка	Ртуть	1,99 мкг/дм ³	0,5 мкг/дм ³
Грудень 2025	р. Південний Буг, 313 км, м. Хмільник	Ендосульфат	0,5 мкг/дм ³	0,1 мкг/дм ³
Грудень 2025	р. Південний Буг, 313 км, м. Хмільник	Гексахлорциклогексан	0,05 мкг/дм ³	0,04 мкг/дм ³
Січень 2026	р. Гірський Тікич, м. Тальне	Хлорпірифос	0,67 мкг/дм ³	0,1 мкг/дм ³

Аналіз таблиці 2 засвідчив, що впродовж другої половини 2025 року в межах Центрального Побужжя спостерегалось зростання максимальних значень нітрат-іонів від 3,78 мг/дм³ у липні до 15,71 мг/дм³ у грудні, сухого залишку – від 1690 до 1844 мг/дм³. У січні 2026 року максимальний вміст нітратів залишався практично на тому самому рівні – 15,68 мг/дм³, що вказує на збереження підвищеного азотного навантаження в зимовий період. Водночас максимальні значення БСК5 зменшилися до 5,80 мгО/дм³, а ХСК – до 48,78 мгО/дм³, що може свідчити про певне зниження органічного навантаження на початку 2026 року.

Аналіз таблиці 3 засвідчив, що у межах Центрального Побужжя у 2025 році та січні

2026 року фіксувалися окремі випадки перевищення нормативних значень за вмістом важких металів і пестицидів. Найбільше перевищення у липні 2025 року встановлено для кадмію нижче с. Гущинці – 13,949 мкг/дм³, що майже у 14 разів перевищує норматив. У районі Сабарівського водосховища також виявлено перевищення за кадмієм і свинцем. У вересні 2025 року у р. Жердь, у межах м. Калинівка, зафіксовано перевищення за ртуттю – 1,99 мкг/дм³, що майже у 4 рази більше допустимого значення. У грудні 2025 року в районі м. Хмільник спостерігались перевищення за окремими пестицидами, у січні 2026 року – за хлорпірифосом у р. Гірський Тікич. Це свідчить про збереження

локальних осередків хімічного забруднення у водних об'єктах регіону.

Отже, результати дослідження в межах Центрального Побужжя показали, що екологічний стан річки Південний Буг формується під впливом поєднання кліматичних змін і антропогенного забруднення неорганічними речовинами. Найбільш уразливими виявилися ділянки в межах урбанізованих територій, насамперед у районі м. Вінниця. Основними індикаторами погіршення якості води є підвищений вміст нітратів, нітритів, фосфатів та амоній-іонів, а також зростання сухого залишку. Це підтверджує доцільність подальшого моніторингу саме середньої течії Південного Бугу як однієї з найбільш чутливих ділянок басейну.

Головні висновки. У 2025 році та січні 2026 року в межах Центрального Побужжя встановлено нестійкий екологічний стан річки Південний Буг. Найбільш показовими є підвищені значення нітрат-іонів, фос-

фат-іонів, амонійного азоту та сухого залишку, що свідчить про поєднаний вплив антропогенного навантаження і кліматичних чинників.

Зафіксовано також окремі випадки перевищення нормативів за вмістом кадмію, свинцю, ртуті та пестицидів, що вказує на наявність локальних осередків хімічного забруднення. Отже, отримані результати підтверджують необхідність подальшого систематичного моніторингу якості води річки Південний Буг.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення системи моніторингу якості поверхневих вод, виявлення екологічних ризиків у межах Центрального Побужжя та обґрунтування водоохоронних заходів. Вони також можуть слугувати основою для прогнозування змін екологічного стану річки Південний Буг в умовах подальших кліматичних змін і антропогенного навантаження.

Література

1. Водний кодекс України: Кодекс України; Закон, Кодекс від 06.06.1995 № 213/95-ВР. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/213/95-%D0%B2%D1%80> (дата звернення: 11.03.2026).
2. План управління річковим басейном Південного Бугу на 2025–2030 роки. Державне агентство водних ресурсів України. 2024. URL: <https://www.davr.gov.ua/plan-upravlinnya-richkovim-basejnom-pivdenного-bugu> (дата звернення: 11.03.2026).
3. Про затвердження Методики віднесення масиву поверхневих вод до одного з класів екологічного та хімічного станів масиву поверхневих вод, а також віднесення штучного або істотно зміненого масиву поверхневих вод до одного з класів екологічного потенціалу штучного або істотно зміненого масиву поверхневих вод: Наказ Мінприроди України від 14.01.2019 № 5. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0127-19> (дата звернення: 11.03.2026).
4. Про затвердження Порядку здійснення державного моніторингу вод: Постанова Кабінету Міністрів України від 19.09.2018 № 758. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/758-2018-%D0%BF> (дата звернення: 11.03.2026).
5. Про охорону навколишнього природного середовища: Закон України від 25.06.1991 № 1264-XII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1264-12> (дата звернення: 11.03.2026).
6. Про схвалення Водної стратегії України на період до 2050 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 09.12.2022 № 1134-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1134-2022-%D1%80> (дата звернення: 11.03.2026).
7. Шахман І. О., Бистрянцева А. М. Інтегральна оцінка якості води річки Південний Буг в умовах змінення клімату. *Екологічні науки*. 2021. № 7–34. DOI: 10.32846/2306-9716/2021.eco.7-34.27.
8. Abalasei M. E., Toma D., Dorus M., Teodosiu C. The Impact of Climate Change on Water Quality: A Critical Analysis. *Water*. 2025. Т. 17. № 21. Ст. 3108. DOI: 10.3390/w17213108.
9. Delpla I., Jung A.-V., Baures E., Clement M., Thomas O. Impacts of climate change on surface water quality in relation to drinking water production. *Environment International*. 2009. Т. 35. № 8. С. 1225–1233. DOI: 10.1016/j.envint.2009.07.001.
10. Dorado-Guerra D. Y., Paredes-Arquiola J., Pérez-Martín M. Á., Corzo-Pérez G., Ríos-Rojas L. Effect of climate change on the water quality of Mediterranean rivers and alternatives to improve its status. *Journal of Environmental Management*. 2023. Т. 348. Ст. 119069. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.119069.
11. Guidance on Water and Adaptation to Climate Change. UNECE. 2009. URL: <https://unece.org/unece-and-sdgs/publications/guidance-water-and-adaptation-climate-change> (дата звернення: 11.03.2026).
12. Richardson C. M. et al. Effects of climate change on river and groundwater nutrient inputs to the coastal ocean. *Communications Earth & Environment*. 2025. Т. 6. DOI: 10.1038/s43247-025-02594-6.
13. Santy S. et al. Increased risk of water quality deterioration under climate change for eutrophication management in the Seine River basin. *Frontiers in Water*. 2022. Т. 4. Ст. 971623. DOI: 10.3389/frwa.2022.971623.
14. Shakhman I., Bystrantseva A. Water Quality Assessment of the Surface Water of the Southern Bug River Basin by Complex Indices. *Journal of Ecological Engineering*. 2021. Т. 22. № 1. С. 195–205. DOI: 10.12911/22998993/128858.
15. Snizhko S., Didovets I., Shevchenko O., Yatsiuk M., Hattermann F. F., Bronstert A. Southern Bug River: water security and climate changes perspectives for post-war city of Mykolaiv, Ukraine. *Frontiers in Water*. 2024. Т. 6. DOI: 10.3389/frwa.2024.1447378.

Дата першого надходження статті до видання: 12.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

ЕКОЛОГІЧНІ РИЗИКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПОЛІГОНІВ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ В МЕЖАХ УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ

Бойко Т.В.¹, Дочинець В.В.¹, Король К.А.¹, Попович Н.П.², Шуплат Т.І.¹

¹Львівський державний університет безпеки життєдіяльності

вул. Клепарівська 35, 79000, м. Львів

Львівський окружний адміністративний суд

вул. Чоловського, 2, 79000, м. Львів

katkincheshi@gmail.com

Стаття присвячена актуальній проблемі оцінки екологічних ризиків, що виникають у процесі експлуатації полігонів побутових відходів у межах урбанізованих територій. Особливу увагу приділено об'єктам, розташованим у безпосередній близькості до житлової забудови та ландшафтів, що використовуються в рекреаційних і туристичних цілях. Об'єктом дослідження обрано полігон міста Борислав Львівської області, який функціонує в умовах тривалого техногенного навантаження. Методологія роботи ґрунтується на застосуванні інтегрованого ризик-орієнтованого підходу. Дослідження поєднує фізико-хімічний аналіз едафотопів (поверхневого шару ґрунту 0-20 см), визначення біологічних показників функціонального стану ґрунтових екосистем та просторовий аналіз із використанням буферних зон на відстані 100, 300 та 700 метрів від тіла полігону. Автори враховують експозиційні чинники – частоту та тривалість контакту населення й рекреантів із ґрунтово-рослинним покривом. У результаті дослідження встановлено формування чіткого просторового градієнта забруднення. У приполігонній зоні зафіксовано перевищення фонових концентрацій Pb, Zn та Cu у 2,0–2,3 раза, причому вміст свинцю та цинку перевищує встановлені ГДК. Біологічна оцінка виявила суттєву деградацію ґрунтового середовища: індекс біологічної активності знизився до 42%, а фітотоксичний ефект зріс до 38% у зоні безпосереднього впливу. Ключовим висновком є те, що негативні біологічні ефекти зберігаються на відстані до 700 м від джерела, навіть коли концентрації металів наближаються до нормативних значень. Наукова новизна полягає в обґрунтуванні експозиційно орієнтованого підходу, який доводить недостатність лише концентраційного аналізу для оцінки реальної небезпеки. Практичне значення результатів полягає у можливості їхнього використання для вдосконалення екологічного моніторингу, просторового планування міст та розробки заходів із рекультивациі територій у межах рекреаційно-туристичних зон. Дослідження підтверджує необхідність врахування специфіки використання земель при оцінці екологічної безпеки об'єктів управління відходами. *Ключові слова:* полігон побутових відходів, урбанізація, урбанізована територія, екологічна безпека, екологічний ризик, едафотопи, важкі метали, біотестування.

Environmental risks of operating municipal waste landfills within urbanized areas. Boyko T., Dochynets V., Korol K., Popovych N., Shuplat T.

The article addresses the critical issue of assessing environmental risks associated with the operation of municipal solid waste (MSW) landfills in urbanized areas. Specific focus is given to facilities located in immediate proximity to residential zones and landscapes used for recreational and tourist purposes. The landfill of the city of Boryslav (Lviv region), operating under prolonged anthropogenic stress, was selected as the study object. The methodology is based on an integrated risk-oriented approach. The research integrates physicochemical analysis of edaphotopes (surface soil layer 0-20 cm), biological indicators of the functional state of soil ecosystems, and spatial analysis using buffer zones at distances of 100, 300, and 700 meters from the landfill body. Exposure factors, including the frequency and duration of contact between the population or visitors and the soil-vegetation cover, were also considered. The study revealed a distinct spatial pollution gradient. In the immediate vicinity of the landfill, background concentrations of Pb, Zn, and Cu were exceeded by 2.0–2.3 times, with lead and zinc levels surpassing the established Maximum Allowable Concentrations (MAC). Biological assessment identified significant soil degradation: the biological activity index decreased to 42%, while the phytotoxic effect increased to 38% within the zone of immediate impact. A key finding is that negative biological effects persist at distances of up to 700 meters from the source, even when heavy metal concentrations approach regulatory standards. The scientific novelty lies in the substantiation of an exposure-oriented approach, demonstrating that concentration-based analysis alone is insufficient for assessing real environmental hazards. The practical significance of the results lies in their potential application for improving environmental monitoring, spatial planning of urban areas, and developing land remediation strategies within recreational and tourist zones. The research underscores the necessity of considering specific land-use patterns when evaluating the environmental safety of waste management facilities. *Key words:* municipal solid waste landfill, urbanization, urban area, environmental safety, environmental risk, edaphotopes, heavy metals, biotesting



Постановка проблеми. Зростання антропогенного навантаження на урбанізовані території зумовлює актуалізацію проблеми екологічної безпеки об'єктів управління відходами, зокрема полігонів побутових відходів. В урбанізованих умовах такі об'єкти часто розташовані в безпосередній близькості до житлової забудови та рекреаційно використовуваних ландшафтів, що значно підвищує потенційні ризики для здоров'я населення та стану навколишнього природного середовища [7, 8].

Полігон побутових відходів міста Борислава, розташований в межах урбанізованої території Дрогобицького району Львівської області, поблизу житлової забудови та земель рекреаційного призначення. За таких умов традиційні підходи до оцінки екологічного стану, які ґрунтуються виключно на порівнянні концентрацій забруднювальних речовин із діючими нормативними значеннями, не завжди можуть дати репрезентативну оцінку рівня екологічної небезпеки [2]. Особливої актуальності дана діяльність набуває у парадигмі положень Закону України "Про управління відходами" прийнятого 20 червня 2022 року та Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року, які ставлять за мету оптимізувати на побудувати ефективну національну систему управління відходами у контексті євроінтеграційного руху України [15, 16].

Важливим є врахування експозиційних чинників, зокрема тривалості, регулярності та характеру контакту населення з ґрунтово-рослинним біогеоценотичним середовищем. Це зумовлює необхідність застосування ризик-орієнтованого підходу, який поєднує фізико-хімічні, біологічні та просторові аспекти оцінки екологічної небезпеки.

Актуальність дослідження. Просторове розташування полігону побутових відходів у безпосередній близькості до житлових і рекреаційних територій, підсилює потенційні екологічні ризики, оскільки формує стійкий зв'язок техногенної зони впливу з компонентами навколишнього природного середовища та передбачає регулярний тісний контакт населення регіону та рекреантів з ґрунтово-рослинним покривом та його біотою. За таких умов екологічна небезпека об'єкта визначається не лише рівнем забруднення, але й характером і тривалістю експозиції. Актуальність дослідження зумовлена зростанням антропогенного навантаження на міські екосистеми та зміною функціонального використання урбанізованих територій, інтенсифікацією рекреаційного освоєння земель у межах міського простору. У умовах такого просторового розвитку традиційні підходи до оцінки екологічного стану, що ґрунтуються виключно на порівнянні концентрацій забруднювальних речовин із нормативними значеннями, є недостатніми для відображення реального рівня екологічної небезпеки [6, 12].

Місто Борислав Львівської області є репрезентативним прикладом урбанізованої території

з тривалим техногенним навантаженням, де функціонування полігону твердих побутових відходів поєднується з активним рекреаційним освоєнням прилеглих ландшафтів. За таких умов навіть відносно помірні рівні забруднення можуть формувати підвищений ризиковий профіль регіону дослідження [13]. У зв'язку з цим актуальним є застосування ризик-орієнтованого підходу до оцінки екологічної небезпеки полігонів побутових відходів у межах урбанізованих територій, який поєднує фізико-хімічні та біологічні показники стану навколишнього середовища з урахуванням експозиційних чинників, що дозволяє більш обґрунтовано оцінити рівень екологічних ризиків і визначити потенційні загрози для населення та рекреаційно використовуваних територій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Оцінка комплексу ризиків забруднення едафотопів поблизу полігонів твердих побутових відходів свідчить, що іони важких металів є домінуючими контамінаціями у середовищі побутових відходів. Найбільшу небезпеку, як показують результати тривалих досліджень, обумовлену міграційно-накопичувальною активністю, становлять іони Cr, Zn, Pb, As та Cd, що є типовими індикаторами таких об'єктів. окремі з них, а саме, As і Cd, можуть перевищувати порогові нормативні значення і створювати потенційні канцерогенні ризики для здоров'я населення. При цьому концентрації іонів важких металів у едафотопіях можуть залежати і від характеристик самого полігону, інтенсивності і тривалості атмосферних опадів, експлуатаційної тривалості об'єкту та конструктивних особливостей покриття [4, 21].

Численні наукові роботи підкреслюють, що забруднення едафотопів у зоні впливу полігонів побутових відходів відбувається не лише через безпосереднє накопичення важких металів, а й через міграційні ланцюги токсикантів у поблизу розташовані поверхневі водні об'єкти та ґрунтові води, що призводить до розширення зони ризику навколо полігону та створює ряд еколого-біобезпекових загроз для екосистем та доступу населення регіону до безпечних природних ресурсів [18, 19].

Питання оцінки ризику для здоров'я населення внаслідок забруднення едафотопів побутовими відходами з різним періодом розкладання також є предметом досліджень. У роботах, що аналізують ризики у навколишньому середовищі великих полігонів, зазначено, що різні методики оцінки, наприклад, базовані на підходах Агенції з охорони довкілля США (US EPA), можуть давати значення ризику певних груп населення, які відповідають високим класам небезпеки. Тому доцільним є використання всебічних підходів до оцінки ризиків, оскільки класичні концентраційні аналізи, не завжди розкривають повної картини потенційних загроз [5, 14].

У цьому контексті важливим напрямом досліджень є інтеграція оцінок екологічних показни-

ків і біологічних реакцій. Підходи, що включають біотестування та фітотоксичність ґрунтів у зонах впливу полігонів побутових відходів, дозволяють виявити негативні чинники техногенного забруднення, які не завжди корелюють із концентраційними даними, оскільки відображають біодоступність і біологічну реакцію організмів на комплекс поллютантів та їх сумішей. Такі методи важливі для оцінки реального функціонального стану ґрунтових екосистем і можуть служити чутливими індикаторами ризику [9, 17].

Соціально-екологічний вимір впливу полігонів також було досліджено у контексті забруднення едафотопів і стану здоров'я населення. Наприклад, дослідження у наукових публікаціях, присвячених екологічному стану африканських та середземноморських регіональних полігонів виявили, що забруднення едафотопів іонами важких металів може бути пов'язане не лише зі зниженням біорізноманіття та деградацією екосистем, але й із реальними ризиками для місцевих громад, у вигляді підвищення концентрацій токсикантів у харчових культурах і водних системах [10, 20].

Сучасні дослідження вказують на важливість комплексної оцінки екологічних ризиків полігонів побутових відходів, що поєднує фізико-хімічні показники, біологічні індикатори та оцінку впливу на здоров'я населення. Водночас потреба у розвитку підходів, що враховують екологічні, соціальні та експозиційні аспекти ризику в межах урбанізованих територій із рекреаційним використанням, є вкрай актуальною і визначає наукову спрямованість цього дослідження.

Новизна. Запропоновано інтегрований експозиційно-орієнтований підхід до оцінки екологічних ризиків полігонів побутових відходів, що поєднує просторовий аналіз концентрацій іонів важких металів у ґрунтах із біологічними показниками стану ґрунтових екосистем. Уперше на прикладі конкретного полігону, встановлено просторовий зв'язок поміж вмістом іонів (Pb, Zn і Cu) і зниженням біологічної активності ґрунтів, що дозволило ідентифікувати зони підвищеного ризику. Даний підхід враховує частоту і тривалість контакту населення з ґрунтово-рослинним середовищем, що підвищує точність оцінки екологічної небезпеки в умовах поєднання важливих для регіону факторів урбанізації та рекреації.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічне значення проведеного дослідження полягає в удосконаленні підходів до оцінки екологічних ризиків функціонування полігону побутових відходів в межах урбанізованих територій шляхом переходу від традиційної концентраційної оцінки до ризик-орієнтованого аналізу з урахуванням рекреаційного використання територій. На відміну від поширених методичних підходів, які зосереджуються переважно на встановленні фактів переви-

щення гранично допустимих концентрацій забруднюючих речовин, у роботі запропоновано інтеграцію фізико-хімічних показників, біологічних індикаторів та просторових характеристик зони впливу полігону побутових відходів [14].

Порівняння отриманих результатів із даними, наведеними у дослідженнях урбанізованих територій, свідчить, що ізольований аналіз концентрацій забруднювачів не завжди дозволяє всебічно оцінити рівень екологічної небезпеки. У низці випадків навіть за відсутності істотних перевищень діючих екологічних нормативів, фіксується зниження біологічної активності ґрунтів і прояви фітотоксичного ефекту.

Це підтверджує доцільність використання біологічних показників як інтегральних індикаторів екологічного ризику, що є методологічним доповненням до традиційних схем екологічного контролю. Важливою складовою запропонованого підходу є врахування просторового градієнта забруднення (на віддалі 300-700 м від джерела впливу) та тривалості техногенного навантаження, що дозволяє перейти від точкової оцінки стану довкілля до аналізу зони екологічного ризику у межах міських і рекреаційно навантажених територій [11].

У загальнонауковому аспекті проведене дослідження розширює уявлення про полігони побутових відходів, як багатфакторні джерела техногенного впливу, екологічна небезпека яких формується рівнем забруднення компонентів довкілля, функціональним використанням територій та характером взаємодії людини із природними середовищем. Вперше для умов рекреаційно привабливої урбанізованої території, обґрунтовано необхідність врахування інтенсивності, тривалості та повторюваності контактів населення з ґрунтовим і рослинним покривом, як складової методології оцінки екологічних ризиків.

Запропоновані методологічні положення можуть бути успішно використані як основа, для порівняльних досліджень подібних техногенно навантажених урбанізованих і рекреаційних територій, а також для вдосконалення науково-методичних засад екологічного моніторингу та оцінки екологічної безпеки об'єктів управління відходами.

Виклад основного матеріалу. Об'єктом дослідження були едафотопи урбанізованих і рекреаційно навантажених територій у зоні впливу полігону побутових відходів міста Борислава Дрогобицького району Львівської області.

Предметом дослідження виступали показники забруднення едафотопів іонами важких металів, біологічний стан техногенно сформованого покриву та пов'язані з цим екологічні ризики.

Відбір проб здійснювали у приповерхневому горизонті (0-20 см) за маршрутно-точковою схемою з урахуванням просторового градієнта техногенного впливу. Географічні координати пунктів

відбору проб були наступними: 49.309183° пн. ш., 23.423907° сх. д.; 49.309576° пн. ш., 23.421842° сх. д.; 49.307563° пн. ш., 23.423412° сх. д.; 49.309277° пн. ш., 23.425696° сх. д.

Просторове розташування полігону, ділянок відбору проб та межі сформованих буферних зон, які становили 100, 300 і 700 м., наведено на рис. 1.

Для оцінки просторової диференціації техногенного впливу сформовано буферні зони на відстанях 100, 300 і 700 м від тіла полігону, що відповідають приполігонній, помірно навантаженій та віддаленій зонам впливу. Використання буферних зон дозволило оцінити просторовий градієнт техногенного впливу та порівняти зміни фізико-хімічних і біологічних показників ґефотопів, по відношенні до джерела забруднення.

Вміст іонів Pb, Zn і Cu визначали стандартними лабораторними методами, рекомендованими для екологічного моніторингу ґрунтів. Для інтегральної оцінки екологічного стану ґрунтів застосовано біо-

логічні методи – індекс біологічної активності та показник фітотоксичного ефекту.

Оцінку екологічних ризиків виконували з урахуванням основних шляхів потенційної експозиції населення – прямого контакту з ґрунтовим середовищем, інгаляційного впливу пилових часток і опосередкованого впливу через рослинний покрив, як одну із основних ланок накопичення поллютантів.

Проведений у науково-дослідній лабораторії екологічної безпеки Львівського державного університету безпеки життєдіяльності, аналіз вмісту іонів важких металів у едафотопіах, засвідчив формування чітко вираженого просторового градієнта техногенного забруднення залежно від відстані до тіла полігону. Найвищі концентрації іонів Pb, Zn та Cu зафіксовано у приполігонній зоні (50-100 м), що є характерною ознакою тривалого впливу досліджуваного об'єкту в умовах відсутності передбачених нормами інженерно-захисних бар'єрів (рис. 2)



Рис. 1. Загальний вигляд території полігону твердих побутових відходів міста Борислав із хаотично розміщеними відходами

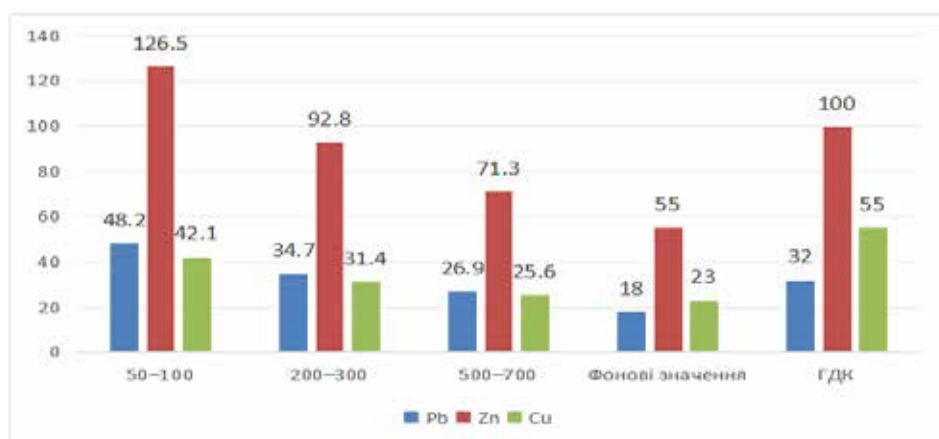


Рис. 2. Вміст іонів важких металів у едафотопіах у зоні впливу полігону побутових відходів м. Борислав, мг/кг (горизонт 0-20 см)

Концентрація іонів Pb у межах територіального діапазону 50-100 м, становила 48,2 мг/кг, що у 2,0-2,3 раза перевищує фонові значення та перевищує гранично допустиму концентрацію, яка становить 32 мг/кг. Вміст у пробі, відібраній на віддалі 200-300 м від тіла полігону становив 34,7 мг/кг, що теж перевищує рівень ГДК. Вміст іонів Pb віддалі 500-700 м від тіла полігону був нижчим за ГДК – 26,9 мг/кг, фоновий рівень – 18 мг/кг.

Аналогічна тенденція спостерігалася і для іонів Zn, вміст якого у приповерхневому горизонті становив 126,5 мг/кг, що перевищує рівень ГДК – 100 мг/кг. Концентрація у пробі на віддалі 200-300 м, становила – 92,8 мг/кг, на віддалі 500-700 м – 71,3 мг/кг, що у обидвох випадках нижче рівня ГДК. Фоновий рівень зафіксований на рівні – 55 мг/кг.

Концентрація іонів Cu у у пробі відібраній на віддалі 50-100 м від тіла полігону, становила 42,1 мг/кг, у пробі з діапазону 200-300 м – 31,4 мг/кг, 500-700 м – 25,6 мг/кг, фоновий рівень – 23 мг/кг. Таким чином перевищень рівня ГДК 55 мг/кг, не зафіксовано.

Спостерігалась тенденція, що зі збільшенням відстані до 500-700 м від тіла полігону, концентрація іонів важких металів, не перевищувала встановлені нормативи. Однак їх рівень залишався вищим за фонові значення, що свідчить про розширену зону техногенного впливу в межах міської та рекреаційної інфраструктури.

Вираженою є лінійна тенденція зменшення концентрацій зі зростанням відстані від досліджуваного полігону твердих побутових відходів. Зосередження максимальних концентрацій у приповерхневому шарі ґрунту є важливим з точки зору оцінки екологічних ризиків, оскільки саме цей горизонт є основним середовищем контакту людини з ґрунтом у процесі рекреаційної діяльності.

Результати біологічної оцінки підтверджують наявність інтегрального негативного впливу комп-

лексу забруднювальних речовин на функціональний стан ґрунтів (рис. 3)

У зоні безпосереднього впливу полігону (50-100 м), індекс біологічної активності знижувався до 42%, що на 40-50% менше порівняно із контрольними ділянками. Одночасно фіксувалося зростання фітотоксичного ефекту до 38%, що свідчить про суттєве пригнічення ростових процесів рослинного покриву і порушення функціонування ґрунтової біоти.

На відстанях 200-300 м спостерігалось часткове відновлення біологічних показників, однак індекс біологічної активності залишався зниженим порівняно з контролем і становив – 57%, а фітотоксичний ефект – 24%.

Навіть на відстанях 500-700 м від тіла полігону, біологічні показники не досягали контрольних значень і становили: індекс біологічної активності – 85%, фітотоксичний ефект – 12%, що свідчить про тривалий і просторово поширений характер техногенного впливу.

Показники у контролі були наступними: індекс біологічної активності – 71%, фітотоксичний ефект – 5%.

Отримані результати демонструють, що ізолюваний аналіз концентрацій забруднювальних речовин не завжди дозволяє достатньо точно оцінити рівень екологічної небезпеки, оскільки біологічні ефекти зберігаються навіть за умов зниження концентрацій до рівнів, близьких до нормативних.

Поєднання результатів фізико-хімічного аналізу та біологічної оцінки ґрунтів дозволило перейти від ізолюваної концентраційної характеристики стану навколишнього природного середовища до комплексної оцінки екологічних ризиків у межах урбанізованої рекреаційно навантаженої території.

Оцінка екологічних ризиків проводилася з урахуванням розселення населення регіону, рекреаційного

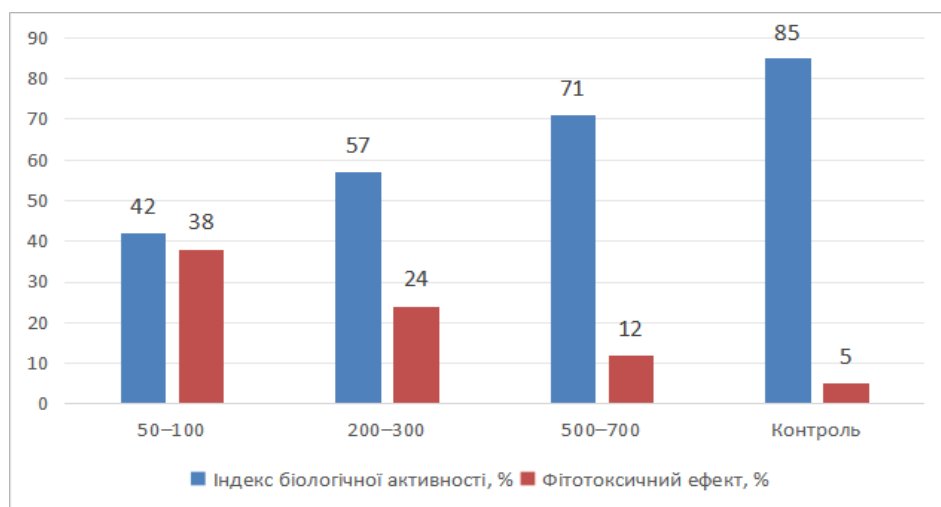


Рис. 3. Показники біологічного стану ґрунтів у зоні впливу полігону побутових відходів м. Борислав

навантаження, рівня впливу на ґрунт інгалаційного впливу пилових часток і опосередкованого впливу через рослинність. В умовах рекреаційного використання територій дані шляхи набувають підвищеної значущості, оскільки контакт із компонентами навколишнього природного середовища має регулярний і сезонний інтенсивний характер [1, 3].

Поєднання перевищень фонових концентрацій іонів важких металів, зниження біологічної стійкості ґрунтів, виражений фітотоксичний ефект підвищений ризиковий профіль територій, прилеглих до полігону побутових відходів. За таких умов навіть помірні рівні забруднення здатні створювати суттєву екологічну небезпеку для рекреаційно використовуваних міських ландшафтів і населення.

Головні висновки. У результаті проведеного дослідження встановлено, що функціонування полігону твердих побутових відходів міста Борислава у межах урбанізованих територій є джерелом формування комплексних екологічних ризиків, зумовлених тривалим техногенним навантаженням, міграцією та акумуляцією забруднюючих речовин у компонентах навколишнього середовища.

Встановлено, що екологічна небезпека має просторово неоднорідний характер і є найбільш вираженою на територіях, безпосередньо прилеглих до полігону, що особливо критично в умовах сконцентрованої міської забудови та використання територій у рекреаційних цілях.

Встановлено, що ґрунтовий покрив виступає середовищем акумулювання забруднюючих речовин і відіграє провідну роль у формуванні екологічних ризиків, оскільки є основним середовищем потенційного контакту людини і біоти з токсикантами.

Результати досліджень підтверджують доцільність застосування комплексного підходу до оцінки екологічної небезпеки, який поєднує фізико-хімічні та біологічні показники стану навколишнього середовища і дозволяє більш повніше оцінити потенційні загрози для урбанізованих екосистем.

Обґрунтовано, що рекреаційне та туристичне використання територій у зоні впливу полігону твердих побутових відходів міста Борислава суттєво підвищує профіль урбанізованого середовища, оскільки збільшує ймовірність експозиції населення та відвідувачів до забруднених компонентів довкілля навіть за помірних рівнів забруднення.

Отримані результати свідчать про необхідність врахування рекреаційного чинника при оцінці екологічної безпеки полігонів побутових відходів, розташованих у межах міст, а також про доцільність

удосконалення системи екологічного моніторингу та розроблення науково обґрунтованих природоохоронних заходів, спрямованих на зниження екологічних ризиків і забезпечення екологічної безпеки рекреаційно привабливих урбанізованих територій.

Результати проведеного дослідження можуть бути використані як науково-методична основа для подальшого розвитку системи екологічного моніторингу полігонів твердих побутових відходів, розташованих у межах урбанізованих та рекреаційно привабливих територій. Отримані дані дозволяють обґрунтовано оцінювати рівень екологічних ризиків з урахуванням специфіки міського середовища, рекреаційного навантаження та потенційних шляхів впливу забруднюючих речовин на населення і відвідувачів туристичних зон.

Практичне використання результатів можливе при розробленні природоохоронних заходів, спрямованих на зниження техногенного навантаження та мінімізацію негативного впливу полігонів твердих побутових відходів на компоненти навколишнього середовища, зокрема ґрунти та рослинний покрив. Матеріали дослідження можуть бути застосовані органами місцевого самоврядування та природоохоронними установами для екологічного обґрунтування рішень у сфері ефективного управління відходами, просторового планування та визначення пріоритетів рекультивації техногенно порушених територій.

Отримані результати доцільно використовувати при оцінці екологічної безпеки рекреаційних територій, плануванні створення туристичної інфраструктури та формуванні зон з обмеженим або регламентованим рекреаційним використанням. Запропонований підхід може бути адаптований для дослідження інших урбанізованих територій із подібними умовами техногенного навантаження, що створює передумови для проведення порівняльних регіональних досліджень та узагальнення отриманих результатів.

Перспективним напрямом подальших досліджень є поглиблення оцінки екологічних ризиків із використанням розширеного спектра біоіндикаційних і екотоксикологічних методів, а також залучення прогнозних моделей для оцінки довготривалого впливу полігонів побутових відходів, на урбанізовані та рекреаційні екосистеми. Це дозволить підвищити наукову обґрунтованість управлінських рішень і сприятиме формуванню комплексної системи забезпечення екологічної безпеки міських та туристично привабливих територій.

Література

1. Balyuk S. A., Medvedev V. V., Lisovyi M. V. Soils of Ukraine: Properties, classification, ecological condition. Kharkiv : NSC ISSAR named after O. N. Sokolovskyi, 2018.
2. Batyr Y., Lopatchenko I., Aliieva P., Akhmedova O., Ruban A., Stankevych S., Zelenin Y., Kanakova A. Environmental protection and public environmental policy in Ukraine. Ukrainian Journal of Ecology. 2021. Vol. 11, № 2. P. 346–348.

3. Demchuk L. I., Korbut M. M., Davydova I. V., Alpatova O. O., Kalenska V. M., Rusetska N. M. Environmental risk of municipal solid waste accumulation at the Zhytomyr city landfill in 2018–2024. *Scientific Journal of Metinvest Polytechnic. Series: Technical Sciences*. 2025. № 4. P. 24–33. URL: <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-3>
4. Dmóchowska A., Polańczyk A., Jarosz W., Czuga-Witrylak M., Matuszkiewicz R. Hazards related to suspended dust in the area adjacent to a closed municipal solid waste landfill. *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*. 2019.
5. Municipal waste management and environmental impacts. Copenhagen : European Environment Agency, 2020.
6. Hiller E., Faragó T., Kolesár M., Filová L., Mihalevič M., Jurkovič I., Demko R., Štefanek J., Vítková M. Metals (metalloids) in urban soils from a historical municipal solid waste landfill: Geochemistry, source apportionment, bioaccessibility and human health risks. *Chemosphere*. 2024. Vol. 356. Article 142677. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142677>
7. Hren L., Chebotarev M., Ruban A., Shvedun V., Sysoieva S., Stankevych S., Smirnova L., Sokolov A. The philosophy of environmental management: Evolution of scientific conceptions. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2021. Vol. 11, № 2. P. 378–381.
8. Soil quality – Laboratory methods for determination of microbial soil respiration (ISO 16072:2002). Geneva : International Organization for Standardization, 2002.
9. Soil quality – Determination of the effects of pollutants on soil flora. Part 1: Method for the measurement of inhibition of root growth (ISO 11269-1:2012). Geneva : International Organization for Standardization, 2012.
10. Korol K., Popovych V. Spectral analysis method for distinguishing heavy metals pollution in the pioneer vegetation of landfills located within the Prikarpatian geobotanical district of Ukraine. *Ecological Engineering & Environmental Technology*. 2023. Vol. 24, № 1. P. 29–37. URL: <https://doi.org/10.12912/27197050/154910>
11. Krasnianskyi M. V. Municipal solid waste landfill as a dangerous uncontrolled biochemical source. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*. 2024. Vol. 9, № 2. P. 230–241. URL: <https://doi.org/10.22161/ijeab.92.26>
12. Medvedev V. V. Monitoring of soils of Ukraine: Concept, methodology, practice. Kharkiv : NSC ISSAR, 2012.
13. Njoku P. O., Edokpayi J. N., Odiyo J. O. Health and environmental risks of residents living close to a landfill: A case study of Thohoyandou landfill, Limpopo Province, South Africa. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2019. Vol. 16, № 12. P. 2125. URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph16122125>
14. Risk assessment guidance for Superfund. Volume I: Human health evaluation manual. Washington : U.S. Environmental Protection Agency, 1989.
15. Про управління відходами : Закон України від 20.06.2022 № 2320-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text>
16. Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80>
17. Попович В. В. Еколого-техногенна небезпека сміттєзвалищ та наукові основи фітомеліоративних заходів їх виведення з експлуатації : дис. ... д-ра техн. наук : 21.06.01. Львів : Львівський державний університет безпеки життєдіяльності ДСНС України, 2017.
18. Попович В. В. Особливості використання транспортних засобів під час транспортування, сортування, утилізації та фітомеліорації твердих побутових відходів. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2012. Т. 22, № 10. С. 90–96.
19. Попович В. В. Полігони твердих побутових відходів у вироблених кар'єрах, ярах, траншеях і особливості їх фітомеліорації. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2012. Т. 22, № 11. С. 119–128.
20. Попович В. В., Бучковський А. І., Попович Н. П. Логістична система транспортування небезпечних відходів в умовах міста. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2013. Вип. 19. С. 166–171.
21. Попович В. В., Кучерявий В. П. Вплив продуктів горіння полігонів твердих побутових відходів на організм людини та біоту. *Пожежна безпека*. 2012. Вип. 23. С. 60–66.

Дата першого надходження статті до видання: 29.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

УДК 662.65:622'11(477.53)+628.474]-913.2:662.641
DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.2-65.48>

ВОЛОГІСТЬ ТА ЗОЛЬНІСТЬ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ І ТОРФУ РОДОВИЩ ПОЛТАВЩИНИ

Серга Т.М., Голік Ю.С.

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
пр. Віталія Грицаєнка, 24, 36011, м. Полтава
tetjanaserga@gmail.com, golik38@i.ua

Постійне зростання обсягів утворення відходів на території Полтавської області та переважно застосування технологій їх видалення, призводить до подальшого збільшення кількості сміттєзвалищ. Водночас, в результаті видалення побутових відходів на сміттєзвалища, втрачаються значні обсяги ресурсоцінних матеріалів, які можуть бути вторинною сировиною та замінювати традиційні невідновлювані природні ресурси. Тому, на сьогодні все більш актуальним стає перехід до нових форм управління побутовими відходами, зокрема, на регіональному рівні, які здійснюють акцент на технології відновлення відходів задля оптимального використання їх ресурсного потенціалу та зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Поряд з цим, залишаються задачі, які окреслені концепцією сталого розвитку: зниження викидів парникових газів, зменшення використання викопних невідновлюваних видів палива, зниження маси побутових відходів та площ, зайнятих полігонами й звалищами, рециклінг відходів.

У статті наведено результати експериментального дослідження вологості та зольності побутових відходів і торфу родовищ Полтавщини як важливих фізико-хімічних показників, що визначають ефективність їх енергетичного використання. Метою дослідження є оцінювання та порівняльний аналіз вологості й зольності побутових відходів і торфу для визначення їх придатності до формування композиційних сумішей. У роботі використано експериментальні методи визначення вологості та зольності з подальшим узагальненням і аналізом отриманих результатів.

Встановлено, що окремі фракції побутових відходів характеризуються підвищеною вологістю та значною варіативністю зольності, що негативно впливає на їх теплотехнічні характеристики. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації технологій перероблення побутових відходів, підвищення ефективності їх енергетичного використання та зменшення екологічного навантаження на довкілля. *Ключові слова:* побутові відходи, торф, вологість, зольність, регіон, фізико-хімічні властивості, термічне перероблення, сталий розвиток, композиційна суміш.

Moisture and ash content of domestic waste and peat from deposits in the Poltava region. Serha T., Holik Yu.

The steady increase in waste generation in the Poltava region, coupled with the predominant use of disposal technologies, is leading to a further rise in the number of landfills. At the same time, the disposal of household waste in landfills results in the loss of significant amounts of valuable materials that could serve as secondary raw materials and replace traditional non-renewable natural resources. Therefore, the transition to new forms of household waste management is becoming increasingly relevant today, particularly at the regional level, with a focus on waste recovery technologies to optimize the use of their resource potential and reduce the negative impact on the environment. At the same time, the challenges outlined by the concept of sustainable development remain: reducing greenhouse gas emissions, decreasing the use of non-renewable fossil fuels, reducing the volume of municipal waste and the land area occupied by landfills and dumpsites, and recycling waste.

This article presents the results of an experimental study of the moisture content and ash content of municipal solid waste and peat from deposits in the Poltava region as important physicochemical indicators that determine the efficiency of their use for energy production. The aim of the study is to evaluate and conduct a comparative analysis of the moisture content and ash content of municipal solid waste and peat to determine their suitability for forming composite mixtures. The study employs experimental methods for determining moisture content and ash content, followed by a synthesis and analysis of the results.

It was found that certain fractions of municipal solid waste are characterized by high moisture content and significant variability in ash content, which negatively affects their thermal properties. The results obtained can be used to optimize household waste processing technologies, improve the efficiency of their energy utilization, and reduce the environmental impact. *Key words:* municipal solid waste, peat, moisture content, ash content, region, physicochemical properties, thermal processing, sustainable development, composite mixture.

Постановка проблеми. Сучасний стан системи поводження з побутовими відходами в Україні характеризується низьким рівнем їх перероблення та захороненням на полігонах. При цьому, значна частка побутових відходів має високий вміст вологи та мінеральних домішок, що безпосередньо впливає на їх енергетичну цінність та вибір технологій пере-

роблення. Особливої уваги потребує дослідження фізико-хімічних характеристик відходів, зокрема вологості та зольності, які є ключовими параметрами при обґрунтуванні ефективних способів їх термічного перероблення. Паралельно, торф родовищ Полтавщини розглядається як альтернативний енергетичний ресурс, який може бути використаний



як самостійне паливо або як компонент композиційних паливних сумішей разом із побутовими відходами. Однак недостатньо вивченими залишаються питання порівняльного аналізу вологості та зольності торфу і побутових відходів.

Актуальність дослідження. Актуальність роботи зумовлена необхідністю підвищення ефективності використання вторинних ресурсів та зменшення негативного впливу відходів на довкілля. В умовах енергетичної нестабільності та зростання вартості традиційних енергоносіїв особливого значення набуває пошук альтернативних джерел енергії, серед яких важливе місце займають побутові відходи та місцеві паливні ресурси, зокрема торф [1].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Авторський доробок спрямований на вирішення актуальних наукових і прикладних завдань у сфері раціонального природокористування, енергозбереження та екологічно безпечного поводження з відходами. Отримані результати досліджень можуть бути використані при розробленні науково обґрунтованих підходів до формування композиційних сумішей на основі побутових відходів і торфу, а також при створенні та модернізації технологій їх перероблення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика дослідження фізико-хімічних властивостей побутових відходів, зокрема їх вологості та зольності, активно висвітлюється у сучасних наукових працях, оскільки ці показники визначають ефективність подальшого перероблення та енергетичного використання відходів. У роботах, присвячених поводженню з побутовими відходами, підкреслюється, що їх морфологічний склад і вологість суттєво впливають на процеси ущільнення, транспортування та первинне оброблення. Зокрема, встановлено залежність технологічних параметрів ущільнення від вологості відходів, що підтверджує необхідність її врахування при проектуванні обладнання та технологій [2]. Дослідження у сфері енергетичного використання відходів показують, що вологість і зольність є визначальними характеристиками при формуванні композиційних сумішей з побутових відходів. Вони впливають на теплотвірну здатність, стадії термічного розкладання та ефективність спалювання, що обґрунтовує необхідність їх детального вивчення [3]. Окрему увагу дослідники приділяють торфу як регіональному паливному ресурсу. Встановлено, що його властивості, зокрема зольність і ступінь розкладу, суттєво варіюються залежно від умов формування родовищ, що впливає на можливості його використання в енергетиці як паливних сумішей [4]. Разом з тим, у сучасних дослідженнях розглядається можливість створення композиційних сумішей на основі побутових відходів і торфу. Зокрема, експериментально доведено доцільність їх сумісного використання для отримання теплової енергії [5].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Незважаючи на наявність значної кількості наукових досліджень, присвячених фізико-хімічним властивостям побутових відходів та торфу, ряд важливих аспектів залишається недостатньо вивченим і потребує подальшого наукового обґрунтування. На сьогодні відсутній комплексний підхід до оцінювання вологості та зольності побутових відходів і торфу саме в умовах Полтавського регіону, що обмежує можливості їх ефективного спільного використання. Отже, вирішенню зазначених питань присвячена дана стаття.

Новизна. У статті вперше отримано та узагальнено результати комплексного дослідження вологості та зольності побутових відходів і торфу родовищ Полтавщини як потенційної сировини для енергетичного використання. Отримані результати розширюють наукову базу у сфері технологій перероблення побутових відходів й альтернативної енергетики, і можуть бути використані для подальших досліджень та практичного впровадження.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічне значення отриманих результатів полягає у формуванні комплексного підходу до оцінювання фізико-хімічних властивостей побутових відходів і природної паливної сировини, зокрема торфу, на основі системного аналізу їх вологості та зольності. Запропонований підхід дозволяє уніфікувати методи дослідження та забезпечити порівняльність результатів, що є важливим для подальшого розвитку технологій перероблення та енергетичного використання відходів.

Виклад основного матеріалу. Відбір проб горючих фракцій побутових відходів для визначення теплотехнічних та екологічних характеристик проводився на території сміттєзвалища селища Котельва Полтавського району Полтавської області (рис. 1). Метою відбору було отримання репрезентативних зразків, що найбільш повно характеризують склад побутових відходів та придатні для подальшого лабораторного аналізу з визначення вологості та зольності.

Для забезпечення достовірності результатів дослідження відбір здійснювали з урахуванням морфологічної неоднорідності відходів та умов їх складування. Ділянки відбору визначали таким чином, щоб вони охоплювали різні частини сміттєзвалища, зокрема зони зі свіжими та частково ущільненими відходами. Це дозволило отримати більш об'єктивну характеристику складу побутових відходів.

Відбір проводили з поверхневого шару та з глибини приблизно 100 см, що дозволяло врахувати вплив процесів зволоження, ущільнення та часткового біологічного розкладання відходів. Підготовлені проби поміщали у поліетиленові пакети для запобігання втрати вологи та зміни фізико-хімічних властивостей до моменту проведення лабораторних



а)



б)

Рис. 1. а) сміттєзвалище селища Котельва; б) зважування дослідних зразків

досліджень. Надалі зразки використовували для визначення вологості та зольності побутових відходів за стандартними методиками.

Такий підхід до відбору та підготовки проб дозволяє отримати достовірні експериментальні дані щодо енергетичних характеристик побутових відходів та забезпечує коректність подальших розрахунків при оцінюванні можливості їх використання як компонентів композиційних палив.

Для дослідження було підготовлено зразки таких компонентів, як папір і картон, глянцева папір, пластик: поліпропілен та поліетилен, текстиль синтетичний, дерев'яні вироби й торф (рис. 2). Попереднє підготування побутових відходів і торфу до експериментального дослідження включало сортування та подрібнення зразків.

Вологість палива впливає на процес спалювання, оскільки висока вологість знижує теплотворну здатність досліджуваних зразків палива, ускладнюючи цим процес горіння. Зольність палива – це критичний показник, висока зольність може вказувати на значну кількість неспалених речовин і, відповідно, на низьку температуру згорання.

Визначення вологості побутових відходів і торфу проводилося термостатичним методом [6]. Метод заснований на висушуванні наважки палива в сушильній шафі при температурі 105-110°C та обчисленні втрати маси. Зольність досліджуваних зразків визначено за допомогою методу повільного озолення у електропечі муфельній СНОЛ 1,6,2,5.1./11М1У4,2 [7]. Даний метод полягає в тому, що початкову температуру муфельної печі збільшують протягом 30 хв до 250 °С, через наступні 30 хв – до 500 °С та ще протягом 1 години – до 800 °С. Методика визначення зольності побутових від-

ходів передбачає вимірювання кількості неорганічного (мінерального) залишку після повного згорання зразка побутових відходів. Зольність є важливим показником при оцінці енергетичного потенціалу відходів, оскільки зола не згорає і не дає енергії.

Вагу досліджуваних зразків до та після висушування визначено за допомогою аналітичних ваг з точністю до 0,0001 г (рис. 3). Використовуючи програмне забезпечення Microsoft Excel, результати оброблених даних дослідження вологості наведені у таблиці 1 і таблиці 2.

Експериментальні дослідження таблиці 1 показують, що такі компоненти як текстиль (15,438%), папір глянцева (13,176%) й деревина (12,816% й 11,743%) мають найвище значення вологості порівняно з пластиком (4,821 й 6,047%). Це свідчить про своєрідну структуру зразків, що має здатність поглинати вологу. Тому рекомендовано висушувати вищенаведені компоненти перед використанням їх як палива для запобігання зниження теплотворної здатності. Низький вміст води торфу (7,267%) пояснюється тим, що для дослідження останній використовувався у спресованому вигляді.

Аналізуючи таблицю 2, можна зробити висновок, що найвище значення зольності має торф, який становить 17,072%. Це вказує на значний вміст неорганічних компонентів у торфі. Наступним за величиною показнику є папір глянцева (11,452%), який в своєму складі може містити значну кількість негорючих речовин (рис. 3).

Білий або сіро-коричневий колір свідчать, що в золі залишився низький відсоток вуглецю. Чорна зола свідчить про високий відсоток вуглецю, що залишився в золі. Тобто, зола є індикатором ефективності спалювання побутових відходів.



Папір і картон



Папір глянцевий



Поліетилен



Поліпропілен

Текстиль
синтетичний

Дерев'яні вироби



Торф

Рис. 2. Відібрані проби побутових відходів і торфу

Рис. 3. Вміст золи після прожарювання торфу (а)
та паперу глянцевого (б)

Головні висновки. У результаті проведеного дослідження вологості та зольності побутових відходів і торфу родовищ Полтавщини встановлено, що побутові відходи характеризуються підвищеною вологістю та значною варіативністю зольності, що обумовлено їх гетерогенним складом і сезонними коливаннями. Це негативно впливає на їх енергетичну цінність та ускладнює процеси термічного перероблення. Визначення вологості та зольності у побутових відходах і торфу важливе для розуміння ефективності процесу спалювання та потенційного впливу на довкілля, оскільки високе значення вологості знижує теплоту згорання, а високе значення зольності може збільшувати кількість шлаку та золи, що ускладнює управління відходами після їх спалювання. Таким чином, використання отриманих результатів сприятиме підвищенню ефективності ресурсозбереження,



Рис. 3. Аналітичні ваги ANG220C

Таблиця 1

Усереднені результати визначення вологості твердого палива

Показник	Вид палива							
	Папір і картон ¹	Папір глянцевий	Пластик		Текстиль синтетичний ³	Деревина ⁴		Торф ⁵
			поліпропілен (PP)	поліетилен (LDPE) ²		ясен	сосна	
Вологість, %	11,472	13,176	4,821	6,047	15,438	12,816	11,743	7,267

Таблиця 2

Усереднені результати визначення зольності твердого палива

Показник	Вид палива							
	Папір і картон ¹	Папір глянцевий	Пластик		Текстиль синтетичний ³	Деревина ⁴		Торф ⁵
			поліпропілен (PP)	поліетилен (LDPE) ²		ясен	сосна	
Зольність, %	5,011	11,452	0,85	1,012	1,364	2,321	1,233	17,072

Примітка:

¹ – папір та картон різного розміру та різної щільності непридатний для сортування як сировина через забрудненість;² – LDPE – поліетилен високого тиску, низької щільності;³ – шматки щільної тканини (синтетика);⁴ – дерев'яні вироби;⁵ – брикетований низинний торф.

розвитку альтернативної енергетики та впровадженню екологічно безпечних технологій поводження з відходами на регіональному рівні.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати дослідження вологості та зольності побутових відходів і торфу родовищ Полтавщини відкривають широкі можливості для їх практичного та наукового застосування. У практичній площині результати можуть бути використані для створення ефективних композиційних сумішей

на основі побутових відходів і торфу з покращеними теплотехнічними характеристиками й оптимізації процесів термічного перероблення з урахуванням вологості та зольності сировини. У науковому аспекті результати дослідження можуть слугувати основою для подальшого вивчення фізико-хімічних й енергетичних властивостей побутових відходів і торфу та розроблення математичних моделей прогнозування теплотвірної здатності та ефективності композиційних сумішей.

Література

- Голік Ю. С., Ілляш О. Е., Монастирський О. М., Чепурко Ю. В., Серга Т.М. Оцінка енергоресурсного потенціалу територіальних громад Полтавської області як складової енергетичної безпеки. *SCIENTIFIC RESEARCH IN THE MODERN WORLD* : Proceedings of III International Scientific and Practical Conference Toronto, Canada 12-14 January 2023. С. 205–215.
- Березюк О. В. Експериментальне визначення компресійної характеристики твердих побутових відходів у сміттевозі з урахуванням їхньої відносної вологості. *Наукові праці БНТУ*. 2019, № 4. С. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2019-4-43-49>.
- Корінчевська Т., Михайлик В., Снежкін Ю. Термічні характеристики палива з твердих побутових відходів. *Scientific Works*. 2023. № 87(1). С. 13–19. DOI: <https://doi.org/10.15673/swonaft.v87i1.2685>.
- Конішук В. В., Шумигай І. В., Душко П. М., Мартиненко В. В. Моніторинг сучасного стану торфовищ Західного Полісся. *Збалансоване природокористування*. 2024. № 3. С. 53–62. DoI: 10.33730/2310-4678.3.2024.314923.

5. Голік Ю. С., Серга Т. М. Експериментальне дослідження теплотворної здатності побутових відходів і торфу як твердого палива. *Збірник наукових праць НУК*. 2025. № 3 (501). С. 219–224. DOI: [https://doi.org/10.15589/znp2025.3\(501\).26](https://doi.org/10.15589/znp2025.3(501).26).
6. ДСТУ CEN/TS 15414-1:2021. Тверде відновлювальне паливо. Визначення вмісту вологи висушуванням. Частина 1. Загальна волога (CEN/TS 15414-1:2010, IDT). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=96976 (дата звернення: 26.03.2026).
7. ДСТУ EN ISO 21656:2021. Тверде відновлювальне паливо. Визначення вмісту золи (зольності) (EN ISO 21656:2021, IDT; ISO 21656:2021, IDT). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=96978 (дата звернення: 26.03.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 30.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

AN ENVIRONMENTALLY SUSTAINABLE APPROACH TO DEMOLITION WASTE IN THE RECONSTRUCTION PROCESS OF UKRAINE

Sorochynska O.L.

National Transport University

Omelianovycha-Pavlenka str. 1, 01010, Kyiv

ellen06.84@ukr.net

The current stage of Ukraine's development is characterized by the simultaneous combination of two large-scale processes – overcoming the consequences of war destruction and forming the foundations of long-term sustainable development. The destruction of residential buildings, industrial facilities, transport and engineering infrastructure has led to the formation of extremely large volumes of destruction waste, which significantly exceed the indicators typical for peacetime. By their nature, this waste is heterogeneous, which complicates their accounting, control and safe handling in conditions of limited resources and damaged infrastructure.

The problem of waste management is becoming particularly urgent due to the environmental risks associated with their uncontrolled accumulation and disposal. Soil and water pollution, dust emissions, release of heavy metals, asbestos and other hazardous substances pose threats to public health and ecosystem functioning. In many cases, these risks are cumulative and long-term in nature, which can negatively affect the restoration of territories in the future.

At the same time, the reconstruction of the country requires significant amounts of construction materials and energy resources, access to which is limited during the war and post-war periods. Under such conditions, destruction waste can be considered not only as an environmental problem, but also as a potential resource capable of reducing the burden on natural resources, reducing greenhouse gas emissions, and increasing the resource efficiency of reconstruction processes.

The transition to sustainable development and a circular economy opens up opportunities to integrate reuse, recycling, and recovery of materials into waste management. This approach combines environmental safety with economic feasibility and social responsibility, which is especially important in the context of rebuilding devastated communities.

The article examines the environmental and economic aspects of handling construction waste (CDW) in the post-war reconstruction of Ukraine. A quantitative assessment of the potential for its recycling is carried out based on scenario analysis. It is established that recycling 60% of CDW allows reducing CO₂ emissions by more than 1.5 million tons and providing an economic effect of more than €240 million. The need to integrate digital technologies and circular economy principles into the construction waste management system is substantiated. *Key words:* sustainable development, environmental management, demolition waste, CDW, circular economy, post-war reconstruction, waste management.

Екологічно сталий підхід до відходів руйнації в процесі відбудови України. Сорочинська О.Л.

Сучасний етап розвитку України характеризується одночасним поєднанням двох масштабних процесів – подолання наслідків воєнних руйнувань та формування основ довгострокового сталого розвитку. Руйнування житлових будинків, промислових об'єктів, транспортної й інженерної інфраструктури призвели до утворення надзвичайно великих обсягів відходів руйнації, які суттєво перевищують типові для мирного часу показники. За своєю природою ці відходи є неоднорідними, що ускладнює їх облік, контроль і безпечне поводження в умовах обмежених ресурсів та пошкодженої інфраструктури.

Проблема управління відходами руйнації набуває особливої актуальності з огляду на екологічні ризики, пов'язані з їх неконтрольованим накопиченням і захороненням. Забруднення ґрунтів і водних ресурсів, поширення пилу, вивільнення важких металів, азбесту та інших небезпечних речовин створюють загрози для здоров'я населення та функціонування екосистем. У багатьох випадках ці ризики мають кумулятивний і довготривалий характер, що може негативно впливати на відновлення територій у майбутньому.

Водночас відбудова країни потребує значних обсягів будівельних матеріалів і енергетичних ресурсів, доступ до яких у воєнний та післявоєнний періоди є обмеженим. За таких умов відходи руйнації можуть розглядатися не лише як екологічна проблема, а і як потенційний ресурс, здатний зменшити навантаження на природні запаси, скоротити викиди парникових газів і підвищити ресурсну ефективність відбудовчих процесів.

Перехід до принципів сталого розвитку та циркулярної економіки відкриває можливості для інтеграції повторного використання, переробки та відновлення матеріалів у систему управління відходами. Такий підхід дозволяє поєднати екологічну безпеку з економічною доцільністю та соціальною відповідальністю, що є особливо важливим у контексті відновлення зруйнованих громад.

У статті досліджено екологічні та економічні аспекти поводження з відходами руйнації (CDW) в умовах післявоєнної відбудови України. Проведено кількісну оцінку потенціалу їх переробки на основі сценарного аналізу. Встановлено, що переробка 60 % CDW дозволяє скоротити викиди CO₂ на понад 1,5 млн тонн та забезпечити економічний ефект понад 240 млн €. Обґрунтовано необхідність інтеграції цифрових технологій і принципів циркулярної економіки у систему управління відходами руйнації. *Ключові слова:* сталий розвиток, екологічний менеджмент, відходи руйнації, CDW, циркулярна економіка, післявоєнна відбудова, управління відходами.



Statement of the problem. The full-scale armed aggression has caused significant destruction of infrastructure and the formation of large-scale flows of destruction waste. According to the international assessment RDNA3, conducted with the participation of the World Bank, the European Commission and the United Nations, their volume exceeds 10–13 million tons [1]. The accumulation of such waste creates a significant environmental burden and requires the formation of a systematic approach to its processing.

The existing waste management systems in Ukraine were designed for peacetime and are not prepared for such extraordinary loads. Much of the infrastructure for processing, sorting and safe storage is damaged or destroyed, and the regulatory framework has limited mechanisms for controlling the management of hazardous waste components. This leads to chaotic accumulation and disposal of waste, which increases the risks of soil, water and air pollution, and creates new threats to public health.

The situation is complicated by the fact that, simultaneously with the accumulation of waste, there is an urgent need to quickly rebuild settlements, provide housing and basic services to millions of citizens affected by the war. The challenges are twofold: the need to quickly restore the housing and industrial stock and environmentally safe handling of millions of tons of construction waste. At the same time, demolition waste can become a valuable resource for secondary use in construction, infrastructure restoration and reducing the burden on natural resources, if the principles of the circular economy are applied.

Thus, the problem of destruction waste management in Ukraine is complex and simultaneously includes issues of environmental safety, resource conservation, technological efficiency, and regulatory regulation. Its solution is a key prerequisite for ensuring sustainable and safe reconstruction of destroyed territories and the formation of long-term environmental and economic stability in the country.

Relevance of the study. The current stage of Ukraine's recovery after large-scale destruction requires a comprehensive and systematic approach to the management of demolition waste, since the efficiency of their use directly affects the environmental safety, pace and quality of reconstruction of territories. The accumulation of millions of tons of construction and demolition materials overloads the existing waste management infrastructure and reveals the limitations of regulatory mechanisms for controlling hazardous components, which increases the risks of environmental pollution and threats to public health. At the same time, demolition waste, subject to the implementation of modern sorting, recycling and reuse strategies, can become an important resource for infrastructure recovery, contributing to reducing the burden on natural resources, reducing landfill volumes and reducing greenhouse gas emissions in accordance with the principles of sustainable development.

The relevance of the study is also determined by the need to adapt international experience of post-war reconstruction to Ukrainian conditions, taking into account the principles of the circular economy and integrating innovative technologies for material flow management. This includes the use of building information modeling (BIM), modular production of building components, mobile and stationary sorting and recycling systems, as well as measures to ensure the safe management of hazardous waste.

The creation of an effective system of sustainable management of demolition waste will simultaneously ensure rapid infrastructure restoration, minimize negative environmental impacts, and ensure the long-term sustainability of Ukrainian communities. Thus, research into the environmental aspects of demolition waste management is extremely relevant for the scientific substantiation of reconstruction strategies, the formation of effective technological and management solutions, and the integration of environmental safety, economic feasibility, and social responsibility into the country's reconstruction processes.

The connection of the author's work with important scientific and practical tasks. The author's work in the study "Environmentally sustainable approach to destruction waste in the process of reconstruction of Ukraine" is aimed at improving scientific methods of analysis and classification of construction waste, as well as developing approaches to their effective processing and minimizing negative impact on the environment. The work contributes to the development of a systemic and environmentally oriented approach to waste management in post-conflict conditions.

Analysis of recent research and publications. The issue of construction and demolition waste (CDW) management is the subject of active scientific research in the world, combining environmental, technological and socio-economic aspects. Particular attention is paid to the issues of integrating the principles of the circular economy, assessing environmental risks and developing effective sorting and recycling technologies to ensure sustainable development and minimize negative environmental impacts.

A review by J. Zuo et al. [2] provides a detailed analysis of global approaches to CDW management, highlighting that traditional methods of disposal and disposal do not meet the requirements of modern environmentally sustainable development. The authors point to the need to implement digital solutions, material life cycle modeling, and comprehensive sorting strategies that can reduce waste volumes, their environmental impact, and increase resource conservation potential.

The study by M. Osmani [3] highlights the importance of building information modeling (BIM) and automated CDW accounting systems as key tools for effective waste management during construction and renovation phases. Digital technologies allow for opti-

mization of sorting, prediction of waste generation, and planning of material reuse.

In the context of sustainable construction, Kibert C. [4] refers to the concept of ecologically balanced design, where the transition to cyclical material management is a key component. Without considering the life cycle of building materials, it is impossible to achieve a low ecological footprint and high resource efficiency of land regeneration.

An analysis of the post-conflict specificity of CDW is considered in the work of Di Maria et al. [5], where it is noted that waste from destruction has an unstable composition and increased risks of toxicity, which complicates its environmentally safe management. H. Yuan et al. [6] in turn propose combined approaches (mechanical processing combined with chemical neutralization) to reduce the risks of soil and water pollution.

Among Ukrainian scholars, V. Biletskyi et al. [7] explore the potential of applying circular economy principles in CDW management in Ukraine, emphasizing that the reuse of construction materials can reduce the need for primary resources and reduce the negative impact on the environment. N. Kovalchuk and I. Hnatyuk [8] analyze the regulatory framework of Ukraine and identify gaps that complicate the implementation of modern sorting and recycling practices. L. Petrenko [9] emphasizes the need for digital monitoring of waste streams in large cities, M. Shevchuk et al. [10] investigate environmental risks associated with asbestos, heavy metals and other toxic impurities in CDW.

In recent years, the topic of CDW in Ukraine has received a new impetus due to military operations. A comprehensive study by O. Safranov, V. Prykhodko and A. Mykhailenko [11] is devoted to the characteristics of demolition waste management. In their work, O. Martsyniuk and O. Khandogina [12] extended these results by analyzing the heterogeneous composition of the waste and hazardous components, emphasizing the lack of technical and institutional support for effective management.

A. Hanoshenko's review [13] highlights the environmental impact of military operations and disruption of waste management infrastructure. S. Palii [14] examines the environmental aspects of building materials recycling with a focus on the reuse of secondary raw materials. T. Ivanova, D. Martynenko and Y. Kushnir [15] explore methods for optimizing dismantling and reuse of materials within the framework of a circular economy. Legal aspects and access to information on military waste are analyzed by A. Gafurova and M. Novak and O. Potip, emphasizing the need to improve the regulatory framework [16-17].

Highlighting previously unresolved parts of the general problem, to which this article is devoted. Despite existing research on demolition waste management, a number of aspects remain insufficiently studied. In particular, there are no systematic approaches to integrating environmentally sustainable demolition waste

processing technologies into post-conflict reconstruction processes. Also, methods for assessing the impact of various disposal methods on the environment and the economic efficiency of reconstruction projects are insufficiently developed.

The article is devoted to the study of these unresolved issues. The author proposes methodological approaches and practical solutions that allow filling the gaps in knowledge regarding the classification, processing and reuse of demolition waste, as well as their integration into the sustainable process of restoring Ukraine's infrastructure.

The novelty lies in the development of a comprehensive environmentally sustainable approach to the management of demolition waste in the context of the reconstruction of Ukraine, which combines methods of classification, processing and reuse of construction materials. The integration of environmental and economic criteria into the decision-making process on waste disposal, which has not been systematically studied before, is proposed. The practical novelty is manifested in the creation of recommendations and models for organizations engaged in infrastructure reconstruction on the implementation of sustainable waste management technologies. This allows to increase the efficiency of construction processes, minimize the negative impact on the environment and promote the sustainable development of post-conflict territories.

Presentation of the main material. Based on generalized analytical assessments of international environmental organizations and expert reviews of the consequences of military destruction in Ukraine, the volume of waste from demolition and damage to infrastructure is estimated at 10–13 million tons per year, depending on the intensity of hostilities and the scale of destruction (Fig. 1). These figures are comparable to the average annual volume of solid household waste generation in peacetime, which indicates a critical increase in the load on the waste management system [1].

As can be seen from Figure 1, during 2022–2025, there is a rapid growth in the volume of demolition waste: from a negligible level in 2022 to over 12 million tons in 2025.

Such an increase in the volume of construction and demolition waste creates a complex of environmental, social and economic challenges. These include the risks of soil and water pollution, landfill overload, the need to create mobile sorting and recycling points, as well as the need to integrate the principles of the circular economy into the processes of post-war reconstruction. In these conditions, the formation of a systematic, environmentally friendly model of destruction waste management, capable of ensuring resource efficiency and environmental safety of the sustainable recovery of Ukraine, becomes particularly relevant.

According to data as of early 2024 (Fig. 2), as a result of the hostilities in the Russian Federation, more than 50% of the housing stock in a significant number of cit-

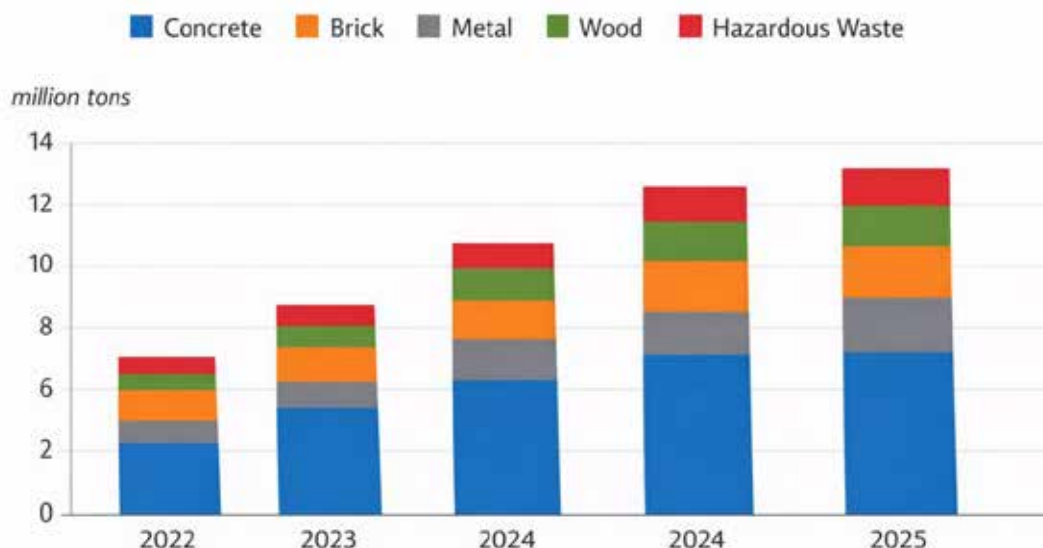


Fig. 1. Dynamics of construction and demolition waste in Ukraine (2022-2025)

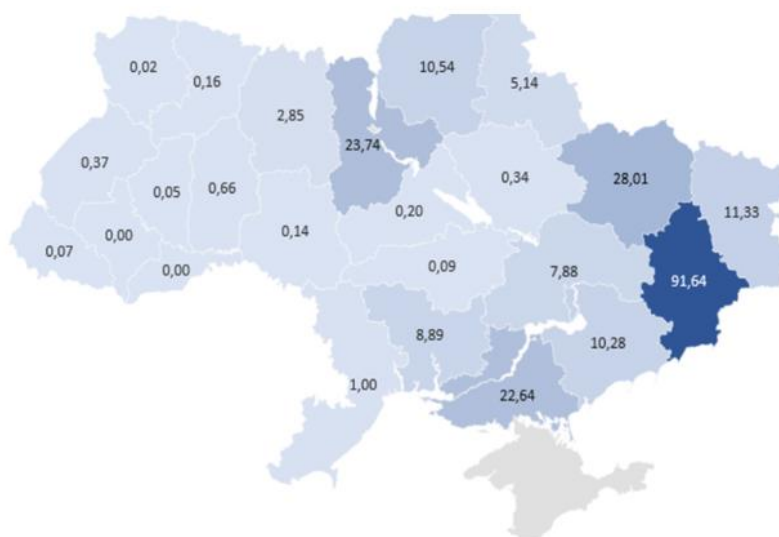


Fig. 2. Regional distribution of the number of destroyed or damaged housing stock, thousand units [18]

ies and towns has been damaged or destroyed [18]. This requires not only the restoration of individual buildings, but also the comprehensive restoration of cities, the development of new urban planning documentation, and other measures.

In post-conflict situations, numerous problems have been identified in the management of construction waste generated by the destruction of infrastructure. This waste is potentially hazardous, as it contains chemical residues, unexploded ordnance (UXO), heavy metals, and asbestos, which pose a serious threat to human health and the environment. The presence of such components complicates the process of waste collection, transportation, and recycling, and failure to comply with safety measures can

lead to acute and chronic poisoning, as well as man-made accidents [19-20].

The situation is made worse by the fact that much of the existing waste management infrastructure has been damaged or completely destroyed as a result of the fighting. This limits the state's ability to effectively process and recycle construction and hazardous waste during and after the conflict. The absence or reduced functionality of landfills, sorting stations, and processing plants leads to the accumulation of hazardous waste in cities and villages, which threatens public health and leads to long-term environmental consequences.

At the same time, the post-war period offers unique opportunities for creating a more reliable, safe and sustainable waste management system. It allows for the

introduction of modern sorting and recycling technologies, including methods for the disposal of hazardous components and the conversion of construction waste into secondary resources. Focusing on the principles of the circular economy allows not only to reduce the negative impact on the environment, but also to increase the efficiency of the use of material resources, stimulating the economic recovery of territories affected by the conflict.

The study reviewed international experience in managing construction waste in post-conflict settings. The experience of Syria shows that complete demolition and construction of new structures is not always cost-effective. An environmentally sound and feasible measure is to repair buildings that have retained their structural integrity but have been damaged by detonation [21]. The efforts of the United Nations Environment Programme (UNEP) to rebuild Iraq and Lebanon demonstrate the importance of prior structural assessment of buildings, global cooperation on waste management, and the use of recycled materials during reconstruction [22]. Thus, a strategy for reusing materials, minimizing demolition, and reducing construction waste is critical for sustainable and safe infrastructure reconstruction.

Effective construction waste management (CDW) is not only a logistical requirement, it is essential for sustainable recovery. Recycling and reuse of construction materials can reduce landfill use, protect natural resources, and reduce greenhouse gas emissions from raw material extraction and transportation. Early implementation of recycling strategies during the design and planning of reconstruction can improve cost-effectiveness and environmental impact [23].

For effective management of demolition waste, it is important to integrate three key strategies:

1. Waste reduction at source – implementation of modern design and construction methods, such as building information modeling (BIM), modular and precision manufacturing, which allows minimizing waste generation at the construction stage.

2. Material reuse – selection and certification of building components for secondary use, implementation of regulatory mechanisms that stimulate the market for recycled materials.

3. Development of recycling infrastructure – application of mobile and stationary sorting technologies, mechanical and chemical processing of materials (con-

crete, steel, phosphogypsum composites), creation of local markets for secondary resources.

These strategies form the basis for developing and comparing scenarios for waste management at different levels of technology, recycling and reuse. To substantiate such scenarios, a quantitative assessment of the total volume of waste is required, which allows for the identification of the potential for landfill reduction, the need for recycling capacity and the possible environmental impact.

According to estimates from the International Assessment of Damage and Recovery Needs for Ukraine (RDNA3), conducted with the participation of the World Bank, the European Commission, and the United Nations, the total volume of demolition waste exceeds 10–13 million tons.

For quantitative analysis, we will assume an average value of 12 million tons of CDW.

Based on generalized European studies, the structure of CDW can be presented as follows (see Table 1):

In order to substantiate the environmental and economic feasibility of processing demolition waste, a scenario analysis of two alternative models was conducted: full disposal and partial processing (60%).

Scenario 1 – 100% landfilling: Assuming full landfilling of 12 million tonnes of CDW, CO₂ emissions from waste transportation and disposal average 18–25 kg CO₂ per tonne. An average value of 22 kg CO₂/t was used for the calculations.

The total emissions are defined as: 12 million tons × 22 kg ≈ 264 thousand tons of CO₂.

The financial costs of disposal (at an average cost of €8–12/t) will be approximately: 12 million t × €10 ≈ €120 million.

Thus, the linear “demolition–disposal” model is accompanied by both significant climate impacts and direct budgetary costs.

Scenario 2 – Recycling 60% of CDW: The alternative scenario involves recycling 60% of the total waste, equivalent to approximately 7.2 million tonnes. This would involve recycling: 70% concrete, 80% metal, 50% brick, 40% wood.

Processing 6.6 million tons of concrete allows for the production of about 4.6 million tons of secondary crushed stone, which reduces the need for the extraction of natural materials by a similar amount.

In addition to the resource effect, there is a significant reduction in CO₂ emissions:

Table 1

Structure of destruction waste by type of materials and their volume, million tons

Component	Fraction, %	Estimated volume, million tons
Concrete and reinforced concrete	55 %	6,6
Brick and ceramics	20 %	2,4
Metal	10 %	1,2
Wood	8 %	0,96
Other materials	7 %	0,84

- concrete recycling provides a reduction of approximately 15 kg of CO₂ per 1 ton, which in total amounts to about 69 thousand tons of CO₂;

- metal recycling allows for a reduction of up to 1.5 tons of CO₂ per 1 ton, which is equivalent to approximately 1.5 million tons of CO₂.

The total emission reduction potential is about 1.57 million tons of CO₂, which is six times higher than the full disposal scenario.

Additional economic results are generated through the sale of secondary materials:

- secondary crushed stone (7–12 €/t): 4.6 million t × 9 € ≈ 41 million €;

- scrap metal (150–250 €/t): 1 million t × 200 € ≈ 200 million €.

The total potential economic impact exceeds €240 million, significantly exceeding the costs of disposal.

To quantitatively compare the considered scenarios for the management of demolition waste, a generalized technical, economic and environmental analysis was performed, taking into account CO₂ emission indicators, the volume of natural resource involvement and financial results. The obtained calculations allow us to assess the cumulative effect of the transition from the scenario of preferential disposal to the scenario with a high share of recycling, as well as to clearly demonstrate the potential benefits of implementing the principles of the circular economy. The results of the comparative analysis are presented in Table 2.

The calculations obtained show that even partial recycling of 60% of demolition waste allows:

- to reduce CO₂ emissions by more than 6 times compared to landfilling;
- to reduce the load on natural quarries;
- to provide an economic effect;
- to form a domestic market for secondary construction materials.

Thus, the implementation of an environmentally sustainable approach to the management of demolition waste is not only environmentally appropriate, but also an economically sound direction for the post-war reconstruction of Ukraine.

Effective CDW management involves the implementation of BIM modeling, digital material registers and waste stream monitoring systems. This allows for optimization of dismantling, minimizing resource losses and ensuring traceability of materials throughout the life

cycle. Figure 3 shows how digital tools, including building information modeling (BIM), modular manufacturing and material tracking systems, are integrated into CDW management processes, optimizing the collection, sorting and reuse of construction materials.

Digital technologies allow for life cycle analysis of materials, planning for component reuse, and ensuring transparency at all stages of waste management. This helps minimize waste generation and increase the efficiency of post-war reconstruction.

Digital tools are key to reducing waste and tracking materials. Systems such as BIM help improve life cycle analysis and resource efficiency, while modular construction allows components to be manufactured in factories, minimizing on-site waste and speeding up the renovation process [24–25].

For effective management of construction waste (CDW), it is important to understand the composition of the materials and their environmental risks. Table 3 summarizes the main components of CDW, potential environmental risks, and reuse options.

As Table 3 shows, most construction materials can pose a serious threat to the environment if mishandled, but at the same time there are real opportunities for their reuse and recycling. In particular, concrete and brick can be used as secondary aggregates, metal for the production of secondary steel, and wood for fuel or composting purposes. In the case of hazardous components such as asbestos or chemical residues, specialized disposal and neutralization methods are required.

Hazardous crushed construction waste (bricks, cement, mortars) can be used not only for construction materials. The simplest use is as a fill for roads and paths or as backfill for excavations that require compaction after filling.

In summary, the analysis of international practices, technological innovations and experience in managing demolition waste during the post-crisis reconstruction period indicates the real possibility of forming a sustainable and systemic reconstruction model in Ukraine. Provided that the principles of the circular economy are consistently integrated, the recycling infrastructure is developed and responsible management decisions in the field of waste management are implemented, the country has the potential to ensure a flexible, comprehensive and environmentally friendly reconstruction.

Main conclusions. It was established that the scale of destruction waste generation in Ukraine creates a significant environmental burden and requires

Table 2

Comparison of CDW handling scenarios

Indicator	waste disposal	Processing 60 %
CO ₂ emissions	264 thousand tons	–1,57 million tons
Use of natural resources	100 %	–4,6 million tons
Financial result	–120 million €	+240 million €

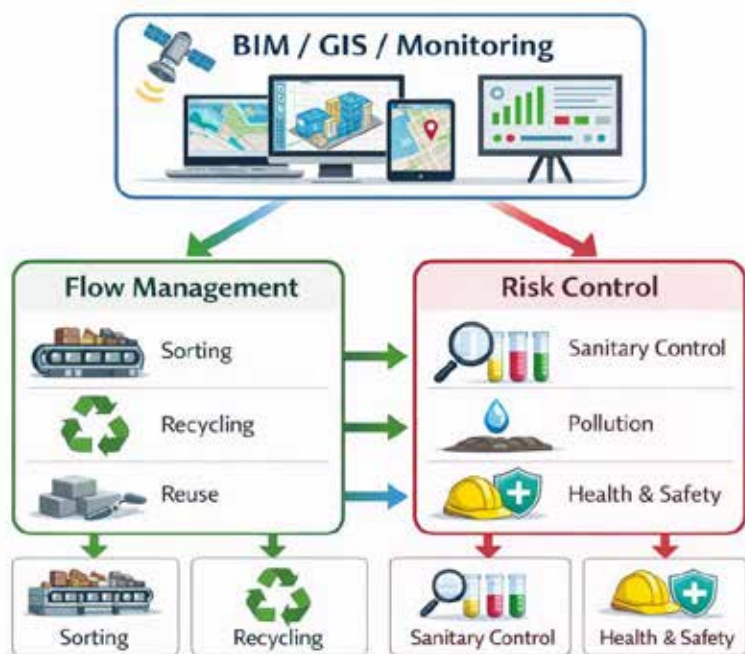


Fig. 3. Integrating digital technologies in CDW management

Table 3

CDW main components and environmental risks

Component	Risks	Potential use
Concrete	Soil pollution	Secondary crushed stone
Brick	Dust, heavy metals	Fillers
Metal	Corrosion, toxic compounds	Recycling, secondary steel
Wood	Dust, rot	Fuel, compost
Asbestos	Carcinogenic fumes	Specialized disposal
Chemical residues	Toxicity, water pollution	Special neutralization methods

a transition from a linear management model to a circular material recycling system. The scenario analysis demonstrated the environmental inefficiency of complete waste disposal, which is accompanied by high greenhouse gas emissions and significant financial costs.

It is substantiated that recycling 60% of demolition waste provides a reduction in CO₂ emissions by more than 1.5 million tons, a reduction in the use of natural resources and a positive economic effect. The feasibility of integrating digital technologies, such as BIM modeling, digital material registers and flow monitoring systems, into the CDW management system to increase the efficiency and transparency of reconstruction processes is proven.

It is confirmed that an environmentally sustainable approach to the management of demolition waste is a strategically important element of the post-war reconstruction of Ukraine and is consistent with the principles of the circular economy. The proposed quantitative approach can be used in the development of state and regional programs for the management of demolition waste.

Prospects for using the research results. The research results can be used to develop strategies for sustainable management of demolition waste and implement effective recycling technologies. This allows for increased environmental safety, rational use of secondary resources, and sustainable development of the infrastructure reconstruction processes in 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/ukraine-third-rapid-damage-and-needs-assessment> (дата звернення: 25.02.2026).
2. Zuo J., Zhao Z., Zhao X. Construction and Demolition Waste Management: Global Approaches and Challenges. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 297. P. 126–389. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126389>

3. Osmani M. BIM for Sustainable Management of Construction and Demolition Waste. *Sustainable Cities and Society*. 2021. Vol. 68. P. 102–112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102801>
4. Kibert C. J. Sustainable Construction: Green Building Design and Delivery. 2022. 412 p. URL: <https://download.e-bookshelf.de/download/0007/6913/92/L-G-0007691392-0013787786.pdf> (дата звернення 25.02.2026).
5. Di Maria F., Misra S., Blanco A. Post-Conflict Management of Construction and Demolition Waste: Challenges and Strategies. *Waste Management*. 2020. Vol. 105. P. 255–265. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.02.008>
6. Yuan H., Shen L., Hao J. Environmental Impacts of Construction and Demolition Waste and Mitigation Measures. *Journal of Environmental Management*. 2022. Vol. 308. P. 527–539. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114527>
7. Білецький В., Сидоренко О., Козак М. Застосування принципів циркулярної економіки у поводженні з будівельними відходами в Україні. *Екологія та економіка*. 2021. № 4, т. 2. С. 35–40.
8. Ковальчук Н., Гнатюк І. Правовий аналіз нормативно-правової бази управління будівельними відходами в Україні. *Юридичний Вісник*. 2021. № 12. С. 54–62.
9. Петренко Л. Моніторинг і цифрові системи обліку CDW у великих містах України. *Інноваційне Будівництво*. 2022. № 3. С. 28–36.
10. Шевчук М., Гончаренко О., Іваненко С. Екологічні ризики азбесту та важких металів у відходах руйнації. *Екологія Людини*. 2022. № 2, т. 6. С. 15–24.
11. Safranov O., Prykhodko V., Mykhailenko A. Management of War-Related Demolition Waste in Ukraine: Challenges and Perspectives. *Journal of Urban Sustainability*. 2024. Vol. 3, № 1. P. 47–58.
12. Martsynyuk O., Khandogina O. Key Characteristics of War-Related Debris and Their Implications for Local Waste Management. *Municipal Economy of Cities*. 2025. Vol. 6, № 1. P. 58–67.
13. Hanoshenko A. Environmental Impacts of Military Operations and Post-Conflict Recovery in Ukraine. *Environmental Policy and Governance*. 2024. Vol. 34, № 4. P. 310–324.
14. Palii S. Circular Economy Approaches to Construction Material Recycling in Ukraine. *Sustainability in Construction*. 2024. Vol. 15, № 9. P. 4823. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15094823>
15. Ivanova T., Martynenko D., Kushnir Y. Optimization of Demolition and Material Reuse Processes in Ukrainian Cities. *Journal of Circular Economy Research*. 2025. Vol. 2, № 2. P. 72–85.
16. Gafurova A., Novak M. Legal and Institutional Framework for War-Related Waste Management. *International Journal of Environmental Law*. 2023. Vol. 12, № 3. P. 145–159.
17. Potip O. Information Access and Digital Tools for Management of Conflict-Related Waste in Ukraine. *Journal of Environmental Informatics*. 2023. Vol. 41, № 2. P. 88–101.
18. Kyiv School of Economics. Data on destruction of housing stock in Ukraine: more than 50 % of housing damaged or destroyed in significant number of cities and towns due to hostilities. *Комерсант*. – URL: <https://komersant.ua/en/tsiny-na-zhytlo-ostannimyro-kamy-vpyeredyly-i-infliatsiiu-i-kurs-dolara-i-zarplaty> (дата звернення: 25.02.2026).
19. Angurets O., Khazan P., Kolesnikova K., Kushch M., Černochová M., Havránek M. Environmental Consequences of the Russian War in Ukraine. Prague : Arnika – Clean Air for Ukraine, 2023. P. 78. URL: <https://cleanair.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/cleanair.org.ua-environmental-consequences-of-russian-war-in-ukraine-war-damages-en-version.pdf> (дата звернення 25.02.2026)
20. Hanoshenko O., Halaktionov M., Huber-Humer M. Exploratory study on the impact of military actions on the environment and infrastructure in the current Ukraine war with a specific focus on waste management. *Waste Management & Research*. 2024. Vol. 43, № 8. P. 1245–1259. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242X241305909>
21. Rezk J., Pons-Valladares O., Muñoz-Blanc C. Evaluating sustainability in post-conflict reconstruction: A case study of blast-damaged buildings without structural collapse risk in Syria. *Buildings*. 2025. Vol. 15, № 3. P. 369–382.
22. United Nations Environment Programme. *Lebanon post-conflict environmental assessment*. Nairobi, 2017. URL: <https://www.unep.org/resources/assessment/lebanon-post-conflict-environmental-assessment> (дата звернення: 25.02.2026).
23. Mohajan H. K. Impacts of construction and demolition waste on environment: An overview. *Studies in Social Science & Humanities*. 2025. Vol. 4, № 3. P. 1–10.
24. Kobayakawa T. Estimating the carbon footprint of post-war reconstruction: Toward a ‘greener’ recovery of Ukraine. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*. 2025. Vol. 5, № 1. P. 150–165.
25. Shvedun V., Bulba V., Bozhko L., Ihnatiev O. Circular economy in Ukraine on the way to European integration: Directions for sustainable management during the war and post-war recovery. *Journal of Environmental Management and Tourism*. 2023. Vol. 14, № 1. P. 194–206. DOI: [https://doi.org/10.14505/jemt.v14.1\(65\).19](https://doi.org/10.14505/jemt.v14.1(65).19)

Дата першого надходження статті до видання: 03.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

КАДАСТРОВЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЛАНДШАФТНОГО ПІДХОДУ ДО УПРАВЛІННЯ ЗЕМЕЛЬНО-ВОДНИМИ СИСТЕМАМИ НА РЕГІОНАЛЬНОМУ РІВНІ

Герасимчук О.Л., Шевчук Л.М., Васильєва Л.А.
Державний університет «Житомирська політехніка»
вул. Чуднівська, 103, 10005, м. Житомир
kgt_gol@ztu.edu.ua, knz_shlm@ztu.edu.ua, knz_vla@ztu.edu.ua

Інтеграція кадастрового забезпечення з ландшафтним підходом є важливою передумовою підвищення ефективності управління земельно-водними системами на регіональному рівні. Актуальність дослідження зумовлена тим, що сучасні кадастрові системи переважно орієнтовані на облік земель і прав власності та недостатньо враховують природні характеристики територій, що обмежує можливості їх використання для екологічно обґрунтованого природокористування.

Метою дослідження є обґрунтування підходів до інтеграції кадастрових даних із ландшафтними та гідрологічними характеристиками території з метою підвищення ефективності управління земельно-водними системами. Методичною основою роботи є поєднання картографічного аналізу ландшафтно-структури території та оцінки можливостей використання кадастрових даних.

На прикладі Житомирської області проаналізовано ландшафтну структуру, яка характеризується різноманітністю морено-зандрових, зандрових, алювіально-зандрових і лесових рівнин. Виділено основні типи ландшафтів, зокрема поліські низовини, заплави річок, схилі території, урбанізовані зони та агроландшафти вододілів, для яких визначено особливості землекористування та екологічні ризики. Встановлено, що існуюча система кадастрового обліку не забезпечує належного врахування гідрологічних умов, рельєфу та екологічних функцій територій. Найбільш проблемними є заплавні та схилі території, де це призводить до порушення режимів використання земель і розвитку деградаційних процесів. Обґрунтовано доцільність доповнення кадастрової системи ландшафтно-орієнтованими показниками, зокрема типом ландшафту, гідрологічним режимом та ерозійною небезпекою. Запропонований підхід забезпечує перехід до диференційованого управління земельно-водними системами та сприяє підвищенню обґрунтованості управлінських рішень.

Результати дослідження можуть бути використані при вдосконаленні системи державного земельного кадастру та розробленні заходів екологічно орієнтованого управління природними ресурсами на регіональному рівні. *Ключові слова:* ландшафтний підхід, державний земельний кадастр, земельні ресурси, водні ресурси, деградовані землі, землеустрій, екологічно орієнтоване управління

Cadastral support for a landscape-based approach to the management of land and water systems at the regional level.
Herasymchuk O., Shevchuk L., Vasilieva L.

The integration of cadastral data with a landscape-based approach is a key prerequisite for improving the efficiency of land and water systems management at the regional level. The relevance of this study stems from the fact that modern cadastral systems are primarily focused on land and property rights registration and do not sufficiently account for the natural characteristics of territories, which limits their potential for environmentally sound natural resource management.

The aim of the study is to substantiate approaches to integrating cadastral data with the landscape and hydrological characteristics of the territory in order to improve the efficiency of land and water systems management. The methodological basis of the work is a combination of cartographic analysis of the territory's landscape structure and an assessment of the potential for using cadastral data.

Using the Zhytomyr region as an example, this study analyzes the landscape structure, which is characterized by a variety of moraine-sand, sand, alluvial-sand, and loess plains. The main landscape types are identified, including Polissya lowlands, river floodplains, slope areas, urbanized zones, and agricultural landscapes of watersheds, for which land use characteristics and environmental risks are determined. It has been established that the existing cadastral registration system does not adequately account for hydrological conditions, topography, and the ecological functions of territories. The most problematic areas are floodplains and slope areas, where this leads to violations of land-use regimes and the development of degradation processes. The feasibility of supplementing the cadastral system with landscape-oriented indicators, specifically landscape type, hydrological regime, and erosion risk, is substantiated. The proposed approach facilitates the transition to differentiated management of land-water systems and contributes to more informed management decisions.

The results of the study can be used to improve the state land cadastre system and to develop measures for environmentally oriented management of natural resources at the regional level. *Key words:* landscape approach, national land cadastre, land resources, water resources, degraded lands, land management, environmentally oriented management



Постановка проблеми. Рациональне управління земельними та водними ресурсами є одним із ключових викликів сучасного природокористування, особливо в умовах зростаючого антропогенного навантаження на територію. На практиці планування використання ресурсів часто здійснюється без урахування природної структури ландшафтів, що призводить до дисбалансу між господарською діяльністю та екологічними можливостями територій. Як наслідок, активізуються процеси деградації ґрунтів, порушується водний режим і зростає ризик екологічних конфліктів.

Існуюча система державного земельного кадастру забезпечує детальну інформацію про межі земельних ділянок і їх правовий статус, проте її використання здебільшого обмежується обліковими функціями. Водночас відсутність урахування ландшафтних характеристик у кадастрових даних ускладнює їх застосування для комплексного управління земельно-водними системами та обґрунтування природоорієнтованих рішень.

На регіональному рівні ці проблеми проявляються ще більш виразно, що підтверджується прикладом Житомирської області, де поєднання різноманітних ландшафтів і активне сільськогосподарське використання територій зумовлюють необхідність переходу до інтегрованих підходів управління.

Актуальність дослідження. Забезпечення збалансованого розвитку територій неможливе без урахування природних закономірностей формування ландшафтів і взаємодії їх компонентів. У сучасних умовах трансформації системи управління природними ресурсами та розширення повноважень територіальних громад особливої ваги набувають підходи, що дозволяють поєднати економічні інтереси з екологічними обмеженнями.

Ландшафтне планування розглядається як ефективний інструмент досягнення таких цілей, оскільки воно орієнтоване на адаптацію господарської діяльності до природних умов території. У цьому процесі державний земельний кадастр може виступати базовою інформаційною платформою, яка забезпечує просторову основу для аналізу та прийняття управлінських рішень.

Водночас практичне використання кадастрових даних для реалізації ландшафтного підходу залишається недостатньо розробленим, особливо на регіональному рівні. Саме тому дослідження можливостей їх інтеграції у систему управління земельно-водними ресурсами на прикладі Житомирської області є своєчасним і має важливе прикладне значення.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Проблематика інтеграції кадастрових даних у систему ландшафтно-орієнтованого управління природними ресурсами безпосередньо пов'язана із сучасними науковими підходами до забезпечення сталого розвитку територій. У межах екологічного управління дедалі більшої ваги набувають дослі-

дження, спрямовані на поєднання просторових даних із природними закономірностями функціонування геосистем. У цьому контексті авторський доробок спрямований на розвиток методичних підходів до використання державного земельного кадастру як інструменту підтримки ландшафтного планування.

Практичне значення дослідження визначається його орієнтацією на вирішення актуальних завдань управління земельними та водними ресурсами на рівні територіальних громад. Зокрема, результати можуть бути використані при розробленні схем просторового планування, стратегій розвитку громад, а також при обґрунтуванні заходів із рационального використання земель і охорони водних об'єктів. Запропонований підхід дозволяє підвищити обґрунтованість управлінських рішень за рахунок урахування ландшафтних особливостей території.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Проблематика інтеграції ландшафтного підходу в управління територіями та рационального використання земельних і водних ресурсів останнім часом активно досліджується у закордонній та вітчизняній науковій літературі. Значна увага приділяється питанням екологізації просторового планування, формування сталих територіальних систем та адаптації європейських підходів до управління природокористуванням.

Гай М. Робінсон [1] розглянув екоцентричні та техноцентричні підходи до сталого управління земельними ресурсами, поєднання яких, на його думку, може запропонувати шляхи майбутнього розвитку людства.

Майкл Г. Соріс та автори [2] дослідили, яким чином адаптацію до змін в екосистемі на сільськогосподарських угіддях можна покращити шляхом підтримки цінностей відповідального управління, пов'язаних із прихильністю до місця, які сповідують землевласники. Автори зазначають, що у соціально-екологічній системі, де переважають приватні землі, розуміння відносин окремої людини з землею є ключовим для розуміння адаптаційної спроможності та визначення варіантів політики, що дозволять успішно реагувати на екологічні зміни.

Поряд із зарубіжними дослідженнями, вагомий внесок у розвиток зазначеної проблематики здійснили й вітчизняні науковці. Зокрема, у дослідженні І.О. Рибалки та авторів [3] розглянуто особливості управління зелено-блакитною інфраструктурою міст у контексті ландшафтно-архітектурного проєктування. Автори акцентують увагу на формуванні екологічного каркасу та забезпеченні просторової зв'язності природних компонентів. Водночас робота зосереджена переважно на урбанізованих територіях і не враховує специфіку земельно-водних систем регіонального рівня, а також не розкриває можливості використання кадастрових інструментів у цьому процесі.

Окремий напрям досліджень формують роботи, присвячені питанням реформування системи управ-

ління земельними ресурсами та розробки інституційних механізмів. Так в працях Третяк А. М. та авторів [4] досліджено систему реформування державного управління земельними ресурсами. Автори відзначають, що основою трансформації управління є перехід у державному управлінні земельними ресурсами та землекористуванням до домінування принципів публічності, відкритості, партнерства, децентралізації, незначної владної дистанції, де кадастрові системи відіграють важливе значення. Водночас недостатньо враховано екологічні та ландшафтні обмеження землекористування, що знижує можливості їх практичного застосування в контексті інтегрованого природокористування.

Коломієць Л.П. та автори [5] дослідили та визначили основні та перспективні напрями становлення і подальшого розвитку інноваційно-інвестиційного сільськогосподарського землекористування об'єднаних територіальних громад в контексті удосконалення системи управління земельними ресурсами на локальному рівні задля комплексного розвитку сільських територій.

Автори [6, 7] присвятили свої дослідження питанням ролі сучасних інформаційних систем і моделювання об'єктів у формуванні нової методологічної парадигми вчення В.І. Вернадського та удосконаленню методичних підходів до формування правових обмежень у системі державного земельного кадастру. Однак зазначені підходи мають переважно теоретичний характер і недостатньо адаптовані до сучасних вимог інтеграції просторових даних у кадастрові системи.

У публікаціях О. В. Лазаревої та співавторів [8, 9] розглянуто європейський досвід планування землекористування та формування моделей управління земельними ресурсами, зокрема в умовах постоєнного відновлення. Автори обґрунтовують необхідність впровадження комплексного підходу, що поєднує правові, економічні та екологічні механізми, а також орієнтацію на принципи сталого розвитку та екологічної безпеки. Разом з тим, зазначені дослідження мають переважно концептуальний та інституційний характер і не приділяють достатньої уваги просторовій диференціації територій за ландшафтними характеристиками. Крім того, поза межами аналізу залишається питання інтеграції природних параметрів території у систему кадастрового обліку як інструменту прийняття управлінських рішень, що обмежує можливість їх безпосереднього використання для територіально диференційованого управління ресурсами.

Дослідження Й. М. Дорош та авторів [10] присвячено аналізу структури земельного кадастру, його організаційно-правових засад та інформаційних процесів, на основі яких наведені пропозиції з виправлення недоліків у функціонуванні системи земельного кадастру.

У дослідженні Браславської О. та авторів [11, 12] значну увагу приділено розгляду передових методик дистанційного геодезичного моніторингу, що мають ключове значення для забезпечення стабільного розвитку територій. Автори зазначають, що введення цифрових технологій та використання сучасних технологій дистанційного моніторингу має значний позитивний вплив на ефективність управління земельними ресурсами. Вони дозволяють не лише оперативно реагувати на зміни в ландшафті, але й створюють основу для раціонального використання землі. Разом з тим, питання інтеграції отриманих даних у систему прийняття управлінських рішень та їх поєднання з кадастровою інформацією залишаються недостатньо опрацьованими.

Таким чином, сучасні наукові дослідження підтверджують зростання ролі ландшафтного підходу та екологічно орієнтованого управління природними ресурсами. Водночас фрагментарність існуючих досліджень та їх переважно галузевий характер зумовлюють відсутність цілісної методології інтеграції ландшафтних і гідрологічних характеристик у кадастрове забезпечення, що ускладнює прийняття обґрунтованих управлінських рішень на регіональному рівні. Це зумовлює необхідність подальших досліджень, спрямованих на формування ландшафтно-орієнтованих підходів до ведення кадастру та управління земельно-водними системами.

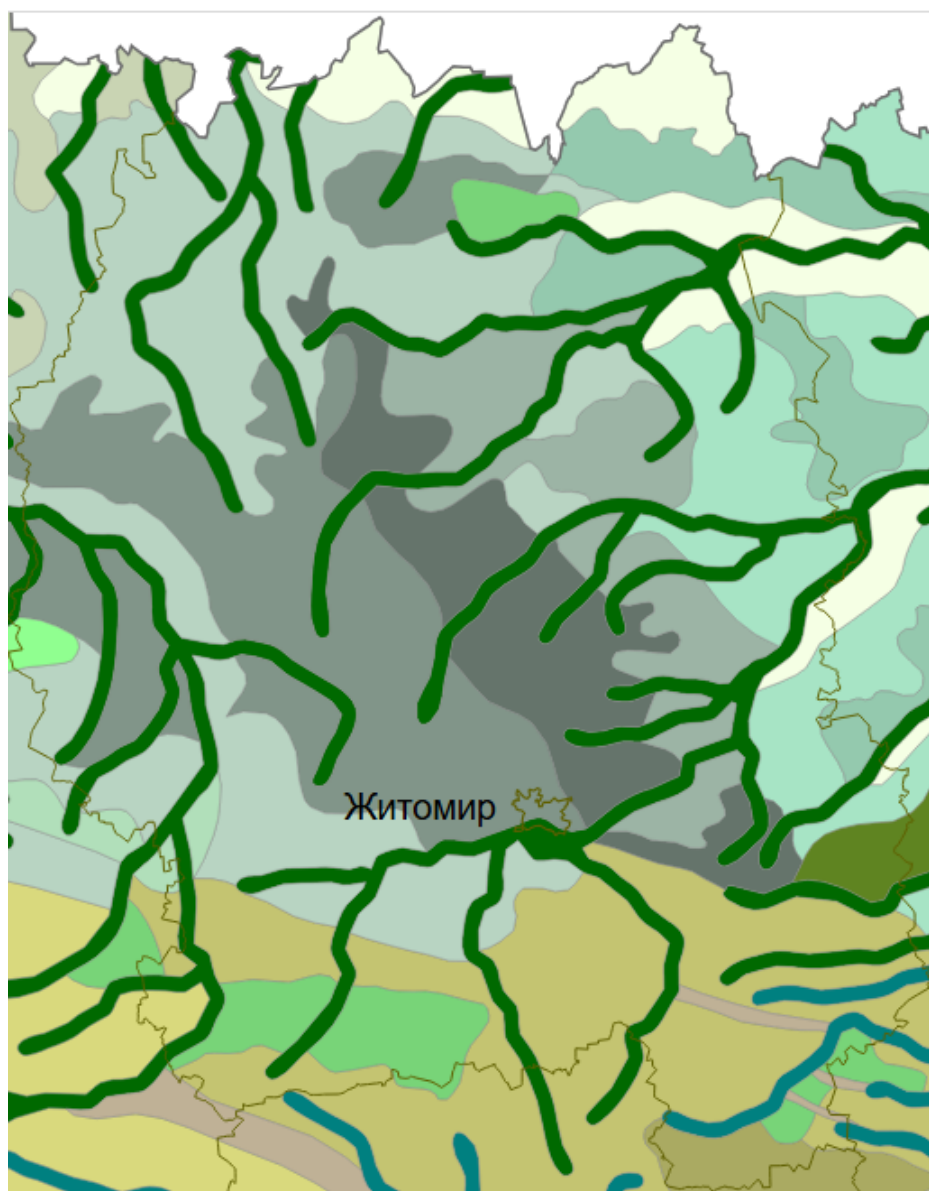
Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.

Незважаючи на розвиток систем управління земельними та водними ресурсами, недостатньо вирішеним залишається питання інтеграції кадастрового забезпечення з ландшафтным підходом на регіональному рівні. Сучасні кадастрові системи переважно орієнтовані на облік земель і прав власності, що обмежує їх використання для комплексного екологічно орієнтованого управління. Водночас відсутні належно обґрунтовані підходи до врахування ландшафтної структури, гідрологічних особливостей та просторових взаємозв'язків у земельно-водних системах, що ускладнює прийняття ефективних управлінських рішень.

Методологічне або загальнонаукове значення.

Метою дослідження є наукове обґрунтування та розроблення підходів до кадастрового забезпечення ландшафтного підходу в управлінні земельно-водними системами на регіональному рівні шляхом інтеграції кадастрових даних із ландшафтною структурою територій, гідрологічними особливостями та екологічними зв'язками для підвищення ефективності та обґрунтованості управлінських рішень.

Методологічне значення роботи полягає у розвитку підходів до інтеграції кадастрових даних із ландшафтным аналізом територій, що забезпечує перехід до системного управління земельно-водними ресурсами. Запропоновані положення розши-



- Моренно-зандрові підвищені рівнини з дерново-середньопідзолистими ґрунтами, з суборами і сугрудками
- Зандрові рівнини з дерново-підзолистими ґрунтами, борами і суборами з денудаційними останцями
- Алювіально-зандрові рівнини з дерново-слабо- і середньопідзолистими ґрунтами, з борами і суборами, низинними болотами
- Моренно-зандрові слабохвилясті рівнини з дерново-середньопідзолистими ґрунтами
- Зандрові рівнини з дерново-слабопідзолистими ґрунтами, з борами і суборами, низинними болотами
- Терасові піщані рівнини з дерново-слабопідзолистими ґрунтами в поєднанні з дерновими і торф'яно-болотними, з суборами і борами
- Розчленовані лесові рівнини з сірими опідзоленими ґрунтами, з грабовими дібровами
- Хвилясті розчленовані лесові височини з сірими і темно-сірими опідзоленими ґрунтами, з грабовими дібровами, ярами і балками, врізаними в кристалічні породи
- Денудаційні хвилясті лесові рівнини з чорноземами типовими малогумусними
- Лісові і лучно-болотні

Рис. 1. Ландшафтна карта Житомирської області [13]

рюють уявлення про кадастр як інструмент просторового планування та екологічного менеджменту, поєднуючи засади землеустрою, гідрології та ландшафтознавства. Це сприяє підвищенню обґрунтованості управлінських рішень і створює передумови для збалансованого природокористування на регіональному рівні.

Викладення основного матеріалу. Для обґрунтування запропонованого підходу проаналізовано ландшафтну структуру Житомирської області (рис. 1). Вона характеризується значною різноманітністю, зокрема поширенням моренно-зандрових, зандрових, алювіально-зандрових і лесових рівнин. Північна та центральна частини області представлені переважно моренно-зандровими та зандровими рівнинами з дерново-підзолистими ґрунтами різного ступеня опідзолення, що зумовлює поширення лісових і лучно-болотних комплексів. Значні площі займають також низинні болота, які відіграють важливу роль у регулюванні водного режиму території.

Особливістю регіону є розвиток алювіально-зандрових рівнин у долинах річок, які формують природні коридори та забезпечують функціонування земельно-водних систем.

Річкова мережа просторово узгоджується з ландшафтною структурою і визначає напрямки міграції водних мас, речовин і біоти, що дозволяє розглядати річкові долини як ключові елементи екологічного каркасу території. У південній частині області поширені денудаційні хвилясті лесові рівнини з малогумусними чорноземами, які характеризуються висо-

ким рівнем сільськогосподарського освоєння та підвищеною ерозійною небезпекою. Перехідні зони між поліськими та лісостеповими ландшафтами відзначаються складною структурою і підвищеною екологічною чутливістю.

На основі аналізу ландшафтно-карти проведено типізацію території та здійснено оцінку можливостей використання кадастрових даних для різних типів ландшафтів (табл. 1). Виділені типи – поліські низовини, заплави річок, схилі території, урбанізовані зони та агроландшафти вододілів – згруповано за характером землекористування, екологічними ризиками та особливостями кадастрового обліку.

Поліські низовини характеризуються домінуванням лісового господарства, значною часткою заболочених територій та наявністю осушувальних систем. Основними проблемами є підтоплення і деградація осушених земель, що недостатньо відображається у кадастрових даних через обмежену деталізацію гідрологічних умов. На основі аналізу ландшафтно-карти проведено типізацію території та здійснено оцінку можливостей використання кадастрових даних для різних типів ландшафтів (табл. 1).

Виділені типи – поліські низовини, заплави річок, схилі території, урбанізовані зони та агроландшафти вододілів – згруповано за характером землекористування, екологічними ризиками та особливостями кадастрового обліку.

Поєднання картографічного аналізу і узагальнення кадастрових характеристик дозволило встановити залежність між типом ландшафту, характером

Таблиця 1

Оцінка можливостей використання кадастрових даних для ландшафтно-орієнтованого управління земельно-водними системами (на прикладі Житомирської області)

Тип ландшафту	Характер землекористування	Основні проблеми	Кадастрові аспекти	Напрями удосконалення управління
Поліські низовини (лісово-болотні)	Лісове господарство, частково сільське господарство	Підтоплення, заболочення, деградація осушених земель	Недостатня деталізація гідрологічних умов, обмежене відображення меліоративних систем	Врахування водного режиму при плануванні, обмеження розорювання
Заплави річок	Сінокосіння, пасовища, частково орні землі	Підтоплення, порушення прибережних захисних смуг	Неповне відображення водоохоронних зон та прибережних смуг у кадастрі	Встановлення обмежень використання, відновлення природних функцій
Схилі території	Інтенсивне землеробство	Водна ерозія, змив ґрунтів	Відсутність прив'язки до рельєфу та ерозійної небезпеки	Впровадження контурного землеробства, консервація деградованих земель
Урбанізовані території	Забудова, інфраструктура	Порушення водного стоку, локальні підтоплення	Обмежена інтеграція кадастру з містобудівною документацією	Узгодження кадастрових і планувальних даних, врахування дренажних систем
Агроландшафти вододілів	Рілля, агровиробництво	Виснаження ґрунтів, зниження вологості	Недостатній облік якісного стану ґрунтів	Впровадження сівозмін, агроекологічне зонування

Складено авторами згідно [14]

його використання та обмеженнями існуючої кадастрової системи.

Проведений аналіз показує, що можливості державного земельного кадастру у забезпеченні ландшафтно-орієнтованого управління реалізуються лише частково. Кадастр містить детальну інформацію про межі та цільове призначення земель, однак недостатньо враховує природні характеристики території, зокрема рельєф, гідрологічні умови та екологічні обмеження.

Найбільш проблемними є заплавні та схиліві території, де відсутність або неповнота даних про природні умови призводить до нерационального використання земель і посилення деградаційних процесів. Водночас результати дослідження свідчать про значний потенціал удосконалення кадастрової системи шляхом доповнення її ландшафтно-орієнтованими показниками, що дозволить підвищити обґрунтованість управлінських рішень з урахуванням природних особливостей території.

Висновки. Проведене дослідження показало, що сучасна система кадастрового забезпечення недо-

статньо враховує ландшафтну структуру територій і їх природні особливості, що обмежує можливості її використання для ефективного управління земельно-водними системами.

Аналіз ландшафтів Житомирської області дозволив виокремити основні типи територій із характерними особливостями землекористування та екологічними ризиками. Найбільш проблемними є заплавні та схиліві ділянки, де неврахування гідрологічних і рельєфних умов призводить до посилення деградаційних процесів.

Обґрунтовано доцільність інтеграції кадастрових даних із ландшафтними характеристиками, що забезпечує більш диференційований підхід до управління. Доповнення кадастру показниками природних умов (тип ландшафту, гідрологічний режим, ерозійна небезпека) сприятиме підвищенню обґрунтованості управлінських рішень.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення методик інтеграції ландшафтних даних у кадастрові системи з використанням геоінформаційних технологій.

Література

1. Robinson, G. Global sustainable agriculture and land management systems. *Geography and Sustainability*. (2024). 5(4): 637-646. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2024.09.001>.
2. Sorice, M., Rajala, K., Brown, B., Masterson, V. and Fuhlerdorf, S. Relationship with the land as a foundation for ecosystem stewardship. *Frontiers in Ecology and Environment*. 2023. 21(6): 282-288. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/fee.2651>.
3. Рибалка І.О., Гончаренко Я.В., Сокольник А.А., Подольхова М.О., Вергелес Ю.І. Особливості управління зелено-блакитною інфраструктурою міст у контексті ландшафтно-архітектурного проектування. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2026. Т. 36, № 1. С. 46-58. DOI: <https://doi.org/10.36930/40360105>
4. Третяк А. М., Третяк В. М., Прядка Т. М., Третяк Р. А., Капінос Н. О. Методологія державного управління земельними ресурсами та землекористуванням. *Агросвіт*. 2021. № 20. С. 14-21. DOI: 10.32702/2306&6792.2021.20.14
5. Kolomiiets, L., Shevchenko, I., & Rysenko, I. Management of land resources of rural areas in the context of the paradigm of sustainable development of Ukraine. *Agriculture and Plant Sciences: Theory and Practice*. 2023. (2), 5-15. DOI: <https://doi.org/10.54651/agri.2023.02.01>
6. Метешкін К.О., Пілічева М.О., Маслій Л.О. Державний земельний кадастр у ноосферній концепції В. І. Вернадського. *Муніципальне господарство міст*. 2022. № 6 (173), С. 86-90. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2022-6-173-86-90>
7. Ковалишин О. Ф., Кришеник Н. І. Удосконалення методичних підходів до формування правових обмежень під час використання земельних ділянок у системі державного земельного кадастру. *Науковий вісник НЛТУ України. Серія Економічна*. 2018, т. 28, № 4. С. 78–82. DOI: <https://doi.org/10.15421/40280414>
8. Лазарєва О. В., Мась А. Ю., Борисевич К. Ю. Особливості планування землекористування в системі управління земельними ресурсами країн Європи та можливості їх застосування в Україні. *Індустрія туризму і гостинності в Центральній та Східній Європі*. 2022. № 6. С. 24-32. DOI: <https://doi.org/10.32782/tourismhospce-6-4>
9. Лазарєва О. В., Ковальова А. І., Юзва В. В. Побудова європейської моделі землекористування у поствоєнний період. *Агросвіт* 2023. № 22. С. 20-26. DOI: 10.32702/23066792.2023.22.20
10. Дорош, І., Ібатуллин, С., Тарнопольський, А., та Дорош, О. Наукове обґрунтування вдосконалення державного земельного кадастру в Україні: теоретичні та методологічні засади. *Землеустрій, кадастр та моніторинг земель*. 2020. № 1. С. 38-49. DOI: <https://doi.org/10.31548/zemleustriy2020.01.05>
11. Браславська О.В., Нестеренко С.В., Герасимчук О.Л. Дистанційний геодезичний моніторинг: ключовий інструмент сталого управління земельними ресурсами. *Містобудування та територіальне планування*. 2025. Вип. 89. С. 488-502. DOI: <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2025.89.488-502>
12. Герасимчук О.Л., Шевчук Л.М., Васильєва Л.А., Кагукіна А.М. Сучасні підходи до управління та відновлення деградованих земель через інноваційні інструменти землеустрою. *Екологічні науки*. 2025. Вип. 60. С. 56-60. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.3-60.10>
13. Карти України. URL: <https://geomap.land.kiev.ua/landscape.html> (дата звернення: 20.03.2026).
14. Екологічний паспорт Житомирської області 2025. URL: <https://eprdep.zht.gov.ua/ecopasport%202024.pdf> (дата звернення: 20.03.2026)

Дата першого надходження статті до видання: 29.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

ТРАНСКОРДОННЕ СПІВРОБІТНИЦТВО ЯК МЕХАНІЗМ РЕАЛІЗАЦІЇ ЦІЛЕЙ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Бутенко О.Г.¹, Карамушко А.В.¹, Васютинська К.А.¹, Мельник С.В.¹, Бизова М.Б.²

¹Національний університет «Одеська політехніка»

пр. Шевченко, 1, 65044, м. Одеса

²Департамент екології та природних ресурсів Одеської обласної державної адміністрації

вул. Канатна, 83, 65007, Одеса

butenko@op.edu.ua; karamushko@op.edu.ua; e.a.vasutinskaya@op.edu.ua;

melnik.s.v@op.edu.ua; maribizova@ukr.net

Метою дослідження є обґрунтування транскордонного співробітництва як механізму реалізації Цілей сталого розвитку в прикордонних регіонах України та суміжних держав, а також визначення умов підвищення його результативності в сучасних безпекових умовах. Показано, що підходи до транскордонної взаємодії еволюціонували від переважно економічного трактування до комплексного бачення, яке охоплює екологічну безпеку, управління природними ресурсами, розвиток інфраструктури, охорону здоров'я, освіту та інституційне партнерство. Запропоновано враховувати ієрархію ЦСР, за якої базове значення має пом'якшення наслідків зміни клімату, а екологічні цілі формують передумови для реалізації економічних і соціальних пріоритетів. Проаналізовано нормативно-правові засади міжнародного територіального співробітництва України та значення державних і європейських програм у розвитку транскордонних ініціатив. Встановлено, що у 2023–2024 роках динаміка зовнішньоторговельних операцій у прикордонних регіонах не забезпечила досягнення запланованих орієнтирів, що відображає вплив воєнних чинників на результативність транскордонного співробітництва. На основі узагальнення практик міжнародних проєктів, зокрема у сферах водної інфраструктури, охорони здоров'я, екологічного моніторингу та екологічної освіти, встановлено, що найбільш результативними є мультисекторальні проєкти, які поєднують інфраструктурні, екологічні, соціальні та освітні складові, спираються на цифрові інструменти управління, багаторівневу координацію та участь місцевих громад. Визначено, що основними обмеженнями розвитку транскордонного співробітництва в Україні залишаються недостатня координація між рівнями управління, обмеженість фінансових ресурсів, недостатній розвиток спільного інформаційного простору та вплив воєнних ризиків. Практичне значення результатів полягає у можливості їх використання під час розроблення програм міжнародного територіального співробітництва, регіональних стратегій розвитку та проєктів, орієнтованих на досягнення ЦСР в умовах воєнного і післявоєнного відновлення. *Ключові слова:* транскордонне співробітництво; Цілі сталого розвитку; прикордонні регіони; екологічні проєкти; регіональна політика; інституційна спроможність

Cross-Border Cooperation as a Mechanism for Achieving the Sustainable Development Goals. Butenko O., Karamushko A., Vasiutynska K., Melnyk S., Byzova M.

The aim of this study is to substantiate cross-border cooperation as a mechanism for achieving the Sustainable Development Goals in the border regions of Ukraine and neighboring countries, as well as to identify the conditions for enhancing its effectiveness under current security challenges. The paper shows that approaches to cross-border interaction have evolved from a predominantly economic interpretation to a more comprehensive perspective encompassing environmental security, natural resource management, infrastructure development, healthcare, education, and institutional partnership. It is proposed that the hierarchy of the Sustainable Development Goals should be taken into account, with climate change mitigation serving as the foundational priority, while environmental goals create the preconditions for the achievement of economic and social priorities. The regulatory and legal framework of Ukraine's international territorial cooperation is analyzed, along with the role of national and European programs in advancing cross-border initiatives. It is established that in 2023–2024 the dynamics of foreign trade operations in border regions failed to meet the planned targets, reflecting the impact of wartime factors on the effectiveness of cross-border cooperation. Based on a synthesis of international project practices, particularly in the fields of water infrastructure, healthcare, environmental monitoring, and environmental education, the study demonstrates that the most effective projects are multisectoral in nature, combining infrastructural, environmental, social, and educational components and relying on digital management tools, multilevel coordination, and the participation of local communities. The main constraints on the development of cross-border cooperation in Ukraine are identified as insufficient coordination across levels of governance, limited financial resources, the underdevelopment of a shared information space, and the impact of wartime risks. The practical significance of the results lies in their potential application to the design of international territorial cooperation programs, regional development strategies, and projects aimed at achieving the Sustainable Development Goals in the context of wartime and post-war recovery. *Key words:* cross-border cooperation; Sustainable Development Goals; border regions; environmental projects; regional policy; institutional capacity.



Постановка проблеми. Зростання екологічних ризиків, посилення просторової взаємозалежності прикордонних територій та необхідність реалізації Цілей сталого розвитку (ЦСР) зумовлюють потребу в ефективних механізмах транскордонного співробітництва. Для України ця проблема є особливо актуальною з огляду на євроінтеграційні процеси, воєнні виклики, потреби відновлення територій, а також необхідність спільного управління природними ресурсами та питання екологічної безпеки. За таких умов наукового значення набуває обґрунтування транскордонного співробітництва не лише як форми міжрегіональної взаємодії, а як дієвого інструменту досягнення екологічних, соціальних і економічних цілей сталого розвитку.

Актуальність дослідження визначається зростанням ролі транскордонного співробітництва як механізму узгодження екологічної, інфраструктурної та безпекової політики на прикордонних територіях. У сучасних умовах воно набуває особливого значення для регіонів, розвиток яких залежить від стану транскордонних екосистем, доступу до транспортно-логістичних маршрутів і спроможності координувати рішення в умовах криз та високої невизначеності. Транскордонні формати взаємодії створюють підґрунтя для узгодження стратегічних пріоритетів, обміну даними, спільного моніторингу та реалізації природоохоронних і соціально-економічних заходів, орієнтованих на досягнення Цілей сталого розвитку. Водночас вони сприяють підвищенню якості стратегічного планування, формуванню спільних індикаторів оцінювання та узгодженню регіональної політики з міжнародними стандартами, що є особливо важливим в умовах воєнних викликів і післявоєнного відновлення.

Запропоновані підходи є актуальними для прикордонних регіонів України, зокрема Закарпаття, Буковини, Волині, Львівщини, Чернігівщини та Сумщини, де розвиток територій значною мірою пов'язаний із функціонуванням спільних ринків, транспортної та енергетичної інфраструктури, використанням природних ресурсів і станом транскордонних екосистем. Для цих регіонів особливо важливими є узгодження дій у сфері управління басейнами транскордонних річок, реагування на природні й техногенні загрози, підтримка гуманітарної та економічної стійкості громад, а також зміцнення інституційної спроможності місцевого самоврядування.

Для Одеського регіону ця проблематика має додаткову актуальність з огляду на його прикордонно-морське положення та належність до простору нижнього Дунаю і Чорноморського басейну. У цьому контексті особливого значення набуває спільне управління водними ресурсами, прибережно-морськими акваторіями, лиманними комплексами та іншими природними системами, що не мають адміністративних меж. За умов воєнних дій, техногенних загроз і ризиків аварійного забруднення зро-

стає потреба в координованому моніторингу, обміні даними та погоджених природоохоронних заходах, оскільки наслідки екологічних інцидентів у таких басейнах мають транскордонний характер.

Не менш важливим дослідження є і для сусідніх держав, що межують з Україною та входять до спільних екологічних, економічних і соціальних систем. Для Республіки Молдова, Румунії, Польщі, Словаччини та Угорщини транскордонне співробітництво виступає інструментом узгодженого управління водними ресурсами, прикордонною інфраструктурою, природоохоронними територіями та ризиками надзвичайних ситуацій. Розвиток спільних підходів до моніторингу, планування та реалізації природоохоронних і соціально-економічних заходів створює підґрунтя для підвищення регіональної стійкості, екологічної безпеки та ефективності міждержавного партнерства.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження проведено в контексті реалізації Цілей сталого розвитку України на період до 2030 року, затверджених Указом Президента України від 30.09.2019 № 722/2019 [1], та узгоджується з положеннями Закону України «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року» від 28.02.2019 № 2697-VIII, Закону України «Про засади державної регіональної політики» від 05.02.2015 № 156-VIII [2] і Закону України «Про міжнародне територіальне співробітництво України» від 24.04.2024 № 3668-IX [3]. Отримані результати відповідають завданням удосконалення механізмів транскордонного співробітництва, екологічно орієнтованого регіонального розвитку, узгодженого управління спільними природними ресурсами та підвищення стійкості прикордонних територій в умовах сучасних безпекових викликів. Міжнародно-правове підґрунтя такого підходу формує також Європейська рамкова конвенція про транскордонне співробітництво між територіальними общинами або властями, до якої Україна приєдналася згідно з Постановою Верховної Ради України (із змінами) від 14.07.1993 № 3384-XII [4].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Як показано авторами [5], одним із важливих інструментів реалізації ЦСР є транскордонне співробітництво, яке забезпечує вироблення узгоджених рішень для територій, що стикаються зі спорідненими економічними, екологічними та соціокультурними викликами. Прикордонні регіони за таких умов постають як ключові простори апробації та впровадження практичних механізмів сталого розвитку (СР), зокрема через поглиблення економічної взаємодії, координацію природоохоронних заходів і зміцнення соціальної сфери [6].

Як зазначено в роботі [7], Україна, маючи спільні кордони із сімома державами, посідає важливе місце в системі європейського транскордонного співро-

бітництва. Автори підкреслюють, що після відновлення незалежності транскордонна взаємодія набула особливої актуальності в контексті європейської інтеграції України, посилення безпекової складової та імплементації принципів сталого розвитку на регіональному і місцевому рівнях. У дослідженні [8] показано, що вагомим інституційним механізмом такої взаємодії стали євро регіони, утворені за участі українських територій, зокрема Карпатський, Буг, Дністер, Верхній Прут, Слобожанщина та інші, які стали платформою для реалізації спільних інфраструктурних, екологічних, освітніх і культурних проєктів. У праці [9] наголошено, що додаткові можливості для розширення партнерства, залучення фінансових ресурсів і впровадження інноваційних практик забезпечують програми Європейського Союзу.

У дослідженнях [10, 11] показано, що транскордонне співробітництво відіграє дедалі вагомішу роль у розв'язанні комплексних проблем розвитку прикордонних регіонів, насамперед у сферах управління водними ресурсами, охорони довкілля, енергетичної безпеки та стимулювання економічної активності місцевих громад. У цих роботах транскордонну взаємодію розглянуто як чинник модернізаційних змін, що сприяє інституційному розвитку, оновленню інфраструктури та зміцненню соціальної згуртованості. Водночас у роботі [10] акцентовано увагу на системних обмеженнях розвитку транскордонної співпраці в Україні, зокрема недостатній інституційній спроможності органів місцевого самоврядування, дефіциті фінансових і кадрових ресурсів, недостатній поінформованості щодо можливостей партнерства та фрагментарності державної політики у цій сфері.

Як свідчать наукові джерела, підходи до розуміння транскордонного співробітництва поступово еволюціонували від переважно економічного трактування до комплексного бачення його ролі у забезпеченні сталого розвитку. На ранніх етапах основна увага зосереджувалася на економічній інтеграції прикордонних територій, розвитку торгівлі, спільних інвестиційних проєктах і залученні прямих іноземних інвестицій [11]. Надалі дослідницький фокус змістився у бік ширшого кола питань, що охоплюють природоохоронну взаємодію, культурну інтеграцію, розвиток інфраструктури та формування спільної регіональної ідентичності [12].

Питання інтеграції транскордонного співробітництва зі цілями сталого розвитку активно розглядалися в межах міжнародних програм і проєктів Європейського Союзу (ЄС), зокрема INTERREG [13]. У дослідженнях [14, 15] транскордонне співробітництво визначено як один із дієвих механізмів забезпечення сталого розвитку прикордонних територій, насамперед через інтеграцію екологічних, економічних і соціальних пріоритетів у спільні програми та проєкти.

В українському науковому дискурсі ця проблематика розглядається у кількох взаємопов'язаних напрямках: розвиток євро регіонів, формування транскордонних інноваційних мереж, стимулювання просторового розвитку, модернізація енергетичного сектору з урахуванням воєнних умов. Авторами [16] підкреслено, що найбільш результативними є комплексні ініціативи, які поєднують економічні, екологічні та соціальні складові, а також спираються на багаторівневу координацію між місцевим, національним і наднаціональним рівнями. Водночас новітні дослідження акцентують увагу на специфічних для України викликах, пов'язаних із воєнними ризиками, політичною невизначеністю, загрозами для критичної інфраструктури та потребою адаптації механізмів транскордонного співробітництва до умов кризи й післявоєнного відновлення [17].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Підсумовуючи, можна стверджувати, що попри наявні наукові здобутки, існує потреба у комплексному дослідженні транскордонного співробітництва саме як механізму досягнення цілей сталого розвитку з урахуванням сучасних українських реалій, специфіки територій, міжнародних зобов'язань України та руху її до членства у ЄС.

Мета роботи є обґрунтування транскордонного співробітництва як механізму реалізації Цілей сталого розвитку в прикордонних регіонах України та суміжних держав, а також визначення умов підвищення його результативності в сучасних безпекових умовах.

Новизна одержаних результатів полягає в обґрунтуванні транскордонного співробітництва як інтегрованого інституційного механізму реалізації ЦСР на рівні прикордонних територій та встановленні його функціонального взаємозв'язку з ієрархією Цілей, у межах якої партнерські механізми забезпечують досягнення екологічних, економічних і соціальних ефектів, а також у визначенні ключових обмежень і перспектив розвитку транскордонного співробітництва України в умовах воєнних ризиків, інституційної нестабільності та євроінтеграційних трансформацій.

Методологічне та загальнонаукове значення дослідження полягає у поглибленні підходів до аналізу транскордонного співробітництва в контексті сталого розвитку прикордонних територій. Запропоноване бачення дає можливість розглядати транскордонну взаємодію як системний механізм узгодження управлінських рішень, ресурсів та інформаційного обміну, спрямований на досягнення екологічних, соціальних і економічних результатів. Поєднання положень екологічної політики, регіонального розвитку, публічного управління та просторового аналізу формує підґрунтя для подальших порівняльних досліджень прикордонних регіонів і вдосконалення практик міжнародного територіального співробітництва в умовах сучасних викликів.

Викладення основного матеріалу. Практична реалізація Цілей сталого розвитку [18] на прикордонних територіях потребує врахування не лише їх взаємозв'язку, а й певної послідовності досягнення, оскільки результативність управлінських рішень значною мірою залежить від коректного визначення пріоритетів. У цьому зв'язку на рис. 1 подано запропоновану ієрархію ЦСР, яка відображає логіку їх поетапної реалізації та дає змогу обґрунтувати послідовність управлінських дій у межах транскордонного співробітництва.

У запропонованій схемі виокремлено чотири групи цілей, а також базову екологічну ціль «Пом'якшення наслідків змін клімату» (ЦСР 13). Її виділення в окремий блок зумовлене тим, що кліматичний чинник істотно впливає на можливості досягнення інших екологічних цілей, насамперед пов'язаних із водними ресурсами, морськими екосистемами та збереженням екосистем суходолу (ЦСР 6, ЦСР 14 та ЦСР 15). За такого підходу екологічні цілі розглядаються як необхідна основа для подальшого просування економічних і соціальних пріоритетів.

Окреме значення мають інституційні цілі, які забезпечують організаційні та управлінські умови реалізації всієї системи ЦСР. Хоча вони не включені безпосередньо до лінійної ієрархії, їх роль є визначальною, оскільки саме рівень інституційної спроможності впливає на результативність екологічної

політики, реалізацію економічних рішень і досягнення соціальних орієнтирів.

В умовах сучасних викликів для України значення інституційного компонента суттєво зростає. Воєнні дії, масштабні екологічні втрати та потреба в їх документуванні, оцінюванні й подальшому врегулюванні засвідчують необхідність посилення інституційної спроможності у сфері екологічного управління. У цьому контексті транскордонне співробітництво може розглядатися як один із механізмів підтримки інституційної стійкості, координації спільних дій і формування передумов для більш результативної реалізації Цілей сталого розвитку в кризових і післякризових умовах.

Транскордонне співробітництво слід розглядати в контексті ЦСР 17 «Партнерство заради сталого розвитку», оскільки саме партнерські механізми створюють організаційну основу для досягнення екологічних, економічних і соціальних цілей. Спільність природних умов і соціально-економічних характеристик прикордонних територій зумовлює наявність спільних викликів, що визначає практичне значення такої взаємодії для раціонального природокористування, охорони довкілля, розвитку інфраструктури та підвищення якості життя населення.

Формування нормативно-правових засад співпраці України із сусідніми державами у сфері збереження довкілля пов'язане, зокрема, з прийняттям Закону України «Про ратифікацію Конвенції про

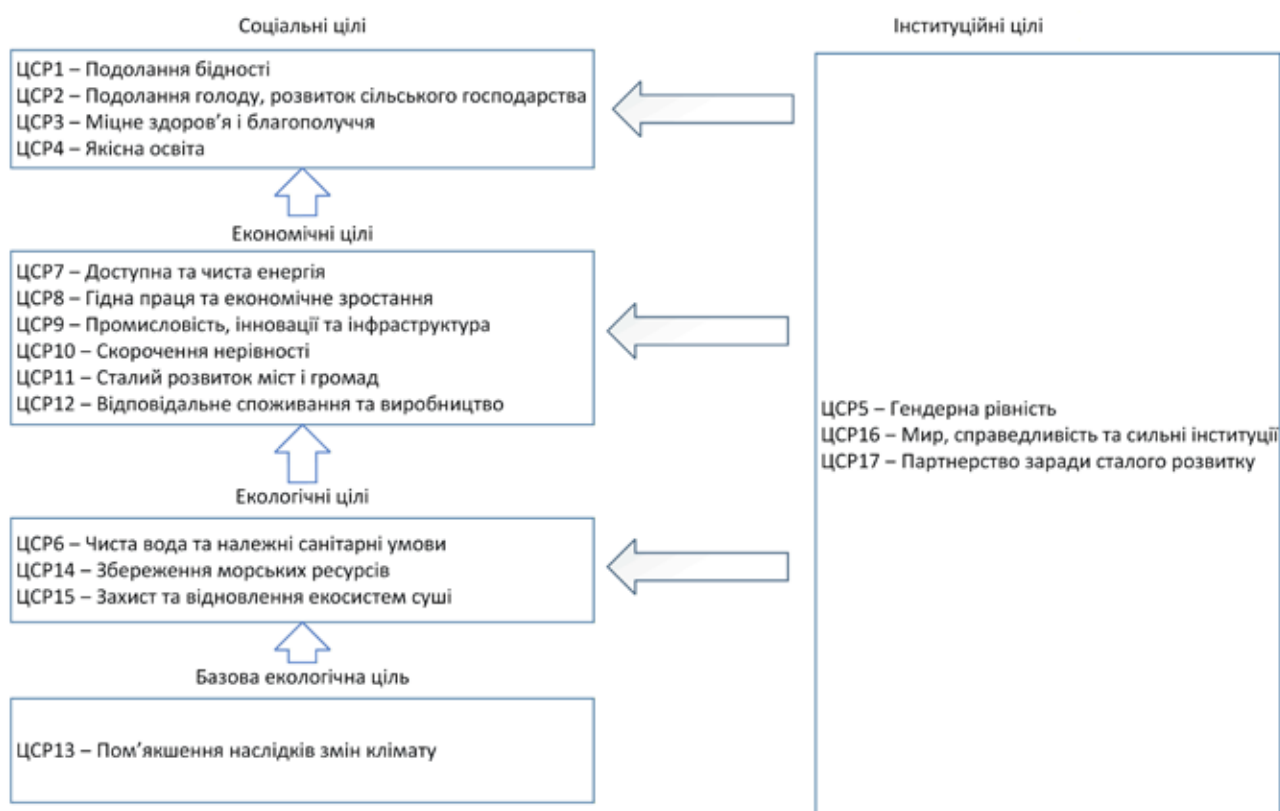


Рис. 1. Ієрархія цілей сталого розвитку

оцінку впливу на навколишнє середовище у транскордонному контексті» [19]. Подальший розвиток правового забезпечення цієї сфери відбувся з ухваленням Закону України «Про міжнародне територіальне співробітництво України» [20]. Нормативне підґрунтя розвитку міжнародного територіального співробітництва також формують Закон України «Про засади державної регіональної політики» [21], Державна стратегія регіонального розвитку на 2021–2027 роки [22] та Державна програма розвитку міжнародного територіального співробітництва на 2025–2027 роки [23].

Одним із кількісних індикаторів результативності транскордонного співробітництва є динаміка експорту та імпорту товарів і послуг у прикордонних регіонах. Відповідно до додатка 3 Державної програми розвитку транскордонного співробітництва на 2021–2027 роки передбачалося щорічне зростання цього показника на 5 % порівняно з базовим 2019 роком. За даними регіональних органів Держстату, до 2022 року в окремих прикордонних областях простежувалася позитивна динаміка зовнішньоторговельних операцій (рис. 2, 3).

У 2023 році в багатьох із них відбулося зниження експорту, тоді як у 2024 році динаміка залишалася неоднорідною, що загалом не забезпечило досягнення орієнтирів, передбачених Державною програмою розвитку транскордонного співробітництва на 2021–2027 роки [24–28]. Така динаміка значною мірою зумовлена впливом повномасштабної війни, яка істотно ускладнила функціонування логістичних ланцюгів, прикордонної інфраструктури та зовнішньоекономічних зв'язків.

В умовах євроінтеграції України транскордонне співробітництво набуває особливого значення як

практичний механізм реалізації Цілей сталого розвитку. Важливу роль у цьому відіграють міжнародні програми, зокрема Interreg Europe 2021–2027, орієнтовані на інновації, діджиталізацію, стартапи та розвиток європейської транспортної мережі й сталої мобільності (ЦСР 9), енергоефективність (ЦСР7); управління відходами (ЦСР11), водними ресурсами (ЦСР6, ЦСР14); якісну освіту (ЦСР4); медицину (ЦСР3); інклюзивність (ЦСР10, ЦСР5); інтегрований міський та сільський розвиток, покращення роботи органів місцевого самоврядування і рівня надання ними послуг громадянам (ЦСР11). Участь у таких ініціативах (із загальним бюджетом 379 млн євро) сприяє гармонізації національної політики з європейськими підходами та активізує реалізацію проєктів сталого розвитку на регіональному рівні.

Важливе місце посідають також спільні освітні та наукові проєкти. Прикладом є проєкт “Establishment of Learning Network for the consolidation effort of joint environmental control and monitoring in the Black Sea Basin 2 (Створення навчальної мережі для консолідації зусиль спільного екологічного контролю та моніторингу Басейні Чорного моря 2)”, спрямований на розвиток екологічного контролю, моніторингу та екологічної освіти в Чорноморському регіоні [29]. Одним із його партнерів був Національний університет «Одеська політехніка», діяльність якого була пов'язана з розробленням освітніх ресурсів, підвищенням рівня екологічної обізнаності та підтримкою функціонування платформи LeNetEco. Організаційну підтримку таким ініціативам забезпечують міждержавні асоціації, зокрема Асоціація транскордонного співробітництва «Євро регіон Нижній Дунай», основні проєкти якої наведено в табл. 1.



Рис. 2. Обсяг експорту товарів та послуг у грошовому еквіваленті прикордонних регіонів України



Рис. 3. Обсяг імпорту товарів та послуг у грошовому еквіваленті прикордонних регіонів України

Серед міжнародних проєктів Асоціації транскордонного співробітництва «Євро регіон Нижній Дунай» особливе значення мають ініціативи у сферах водної інфраструктури, охорони здоров'я та екологічного моніторингу. У сукупності вони засвідчують, що транскордонне співробітництво є дієвим механізмом досягнення ЦСР через поєднання інфраструктурних, соціальних, освітніх та екологічних складових розвитку.

Реалізація принципів сталого розвитку в прикордонних регіонах сприяє комплексному розв'язанню екологічних і соціально-економічних проблем. Спільні проєкти у сферах управління водними ресурсами, охорони біорізноманіття та зниження кліматичних ризиків дають змогу зменшити антропогенне навантаження на довкілля, підвищити стійкість територій до природних і техногенних загроз, а також активізувати інституційну взаємодію між органами влади, науковими установами, бізнесом і громадськістю. Важливого значення при цьому набувають екологічна освіта, ресурсозбереження, енергоефективність і участь місцевих громад у процесах прийняття рішень.

Водночас розвиток транскордонного співробітництва в Україні стримується недостатньою міжрівневою координацією, обмеженістю фінансових ресурсів і недостатнім розвитком спільного інформаційного простору. Перспективи його подальшого посилення пов'язані з європейською інтеграцією, зміцненням інституційної спроможності на місцевому рівні та впровадженням цифрових інструментів управління й обміну даними.

Аналіз успішних практик засвідчує, що результативні проєкти транскордонного співробітництва мають кілька спільних рис, зокрема:

- *мультисекторний підхід*, за якого поєднуються економічна, екологічна та соціальна складові розвитку;

- *інноваційні технології та цифровізація управлінських процесів*, які полегшують координацію спільних дій, обмін даними та підвищують оперативність реагування на екологічні й ресурсні виклики;

- *участь громадських організацій*, оскільки їх залучення до планування та реалізації проєктів сприяє підвищенню їх якості, прозорості та суспільної підтримки;

Тож, перспективи оптимізації транскордонного співробітництва пов'язані з удосконаленням інституційної бази, розвитком фінансових інструментів і ширшим залученням громадянського суспільства. Важливими напрямками є посилення координації між рівнями влади, розширення доступу до інвестиційних і грантових ресурсів, а також підтримка партисипативних механізмів, що підвищують гнучкість і адаптивність регіональних стратегій.

Головні висновки та перспективи використання результатів дослідження. У результаті дослідження встановлено, що транскордонне співробітництво є важливим механізмом реалізації Цілей сталого розвитку в прикордонних регіонах України, оскільки створює умови для узгодження екологічних, економічних і соціальних пріоритетів розвитку. Показано, що його практична результативність виявляється у можливості залучення інвестицій, підтримки малого і середнього бізнесу, створення нових робочих місць, підвищення ефективності управління природними ресурсами, зменшення екологічних ризиків, впровадження заходів адаптації до змін

Таблиця 1

**Міжнародні проєкти та результати діяльності Асоціації транскордонного співробітництва
«Євро регіон Нижній Дунай»**

Назва та сутність проєкту	Коротка характеристика	Обсяг фінансування, тис. EUR	Відповідність цілям сталого розвитку
LeNetEco 2 Створення навчальної мережі для консолідації зусиль спільного екологічного контролю та моніторингу Басейні Чорного моря 2	Створення навчально-інформаційної платформи LeNetEco, електронної карти екологічного моніторингу, навчальних курсів для цільових груп і спільної міжнародної групи з екологічних досліджень та моніторингу в країнах Чорноморського басейну.	773,03	ЦСР 4 Якісна освіта ЦСР 6 Чиста вода та належні санітарні умови ЦСР 14 Збереження морських ресурсів ЦСР 17 Партнерство заради сталого розвитку
HEALTH/4.1/1 Cross-Border Health Infrastructure «Транскордонна інфраструктура охорони здоров'я»	Підвищення доступу населення Євро регіону Нижній Дунай до якісних медичних послуг через модернізацію медичної інфраструктури в Тулчі, Мечині та Ізмаїлі, а також через розвиток спільної стратегії у сфері охорони здоров'я, телемедицини та профілактики епідемії. Демонструє роль транскордонного співробітництва у досягненні ЦСР 3 через модернізацію лікарняної інфраструктури, впровадження телемедицини та формування спільних механізмів реагування на епідеміологічні виклики	4200	ЦСР 3 Міцне здоров'я і благополуччя ЦСР 9 Інновації та інфраструктура ЦСР 10 Зменшення нерівності ЦСР 17 Партнерство заради сталого розвитку
EFIGE – Cross-Border Ensemble. Heritage Confluence on Danube (2SOFT/2.1/64) Транскордонний ансамбль. Спадщина як простір взаємодії на Дунаї	Проєкт орієнтований на міждисциплінарну валоризацію і просування культурного, етнографічного, гастрономічного, виноробного та частково природного спадку прикордонної території Ізмаїл–Тулча–Галац. У проєктній картці акцентовано збереження та сталі управління транскордонною культурною й екологічною спадщиною та підвищення привабливості території.	946,29	ЦСР8 Гідна праця та економічне зростання ЦСР 11 Сталий розвиток міст і громад ЦСР17 Партнерство заради сталого розвитку
Clean River «Чиста річка»	Транскордонний інфраструктурний проєкт із реабілітації та модернізації каналізаційних мереж і насосної станції в Ізмаїлі, а також елементів систем очищення стічних вод у Тулчі; включав спільний моніторинг, стратегію реагування на надзвичайні ситуації та навчання стейкхолдерів. Є прикладом транскордонної ініціативи, спрямованої на модернізацію водовідведення та очищення стічних вод у межах Нижньодунайського регіону,	4353,696	ЦСР 6 Чиста вода та належні санітарні умови ЦСР 11 Сталий розвиток міст і громад ЦСР 13 Боротьба зі зміною клімату ЦСР17 Партнерство заради сталого розвитку

клімату, а також розвитку освітньої, культурної та соціальної взаємодії.

Обґрунтовано, що найбільш ефективними є транскордонні ініціативи, засновані на поєднанні інфраструктурних, екологічних, соціальних та освітніх складових, використанні цифрових інструментів управління, багаторівневій координації та залученні місцевих громад до процесів планування і реалізації проєктів. Водночас встановлено, що подальший розвиток транскордонного співробітництва в Україні

стримується недостатньою узгодженістю дій між різними рівнями управління, обмеженістю фінансових ресурсів, нерозвиненістю спільного інформаційного простору та впливом воєнних ризиків.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості їх використання під час формування регіональної політики, розроблення програм міжнародного територіального співробітництва, підготовки екологічних і соціально-економічних проєктів, а також удосконалення

механізмів управління розвитком прикордонних територій. Перспективи подальшого використання результатів дослідження пов'язані з адаптацією механізмів транскордонного співробітництва до умов воєнних і післявоєнних викликів,

розширенням участі України в європейських програмах, посиленням інституційної спроможності на місцевому рівні та впровадженням сучасних цифрових рішень для координації спільних дій і обміну даними.

Література

1. Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року: Указ Президента України від 30.09.2019 № 722/2019. URL: <https://www.president.gov.ua/documents/7222019-29825> (дата звернення: 02.03.2026).
2. Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року: Закон України від 28.02.2019 № 2697-VIII / Верховна Рада України. Відомості Верховної Ради. 2019. № 16. Ст. 70. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text> (дата звернення: 02.03.2026).
3. Про міжнародне територіальне співробітництво України: Закон України від 24.04.2024 № 3668-IX / Верховна Рада України. База даних «Законодавство України». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/3668-20> (дата звернення: 26.03.2026).
4. Про приєднання України до Європейської рамкової конвенції про транскордонне співробітництво між територіальними общинами або властями: Постанова Верховної Ради України від 14.07.1993 № 3384-XII / Верховна Рада України. Відомості Верховної Ради України. 1993. № 36. Ст. 370. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3384-12#Text> (дата звернення: 06.03.2026).
5. Perkmann M. Cross-border regions in Europe: Significance and drivers of regional cross-border co-operation. *European Urban and Regional Studies*. 2003. Vol. 10, No. 2. P. 153–171. DOI: <https://doi.org/10.1177/0969776403010002004>
6. Scott J. W. European politics of borders, border symbolism and cross-border cooperation. In: *A Companion to Border Studies*. 2012. P. 83–99. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118255223.ch5>
7. Fetko Y. Cross-border and regional cooperation between Ukraine and the European Union: historical and legal aspect. *Visegrad Journal on Human Rights*. 2023. No. 1. P. 182–185. DOI: <https://doi.org/10.61345/1339-7915.2023.1.26>
8. Shaban T. Cross-Border Cooperation in the Carpathian Euroregion: Ukraine and the EU. *Borders in Globalization Review*. 2019. Vol. 1, No. 1. P. 43–53. DOI: <https://doi.org/10.18357/bigr11201919258>
9. Корнелюк О. А., Матюшок В. В. Транскордонне співробітництво регіонів України в контексті розвитку міжнародної економічної інтеграції. *Підприємництво та інновації*. 2021. № 20. С. 18–24. DOI: <https://doi.org/10.37320/2415-3583/20.2>
10. Durand F., Decoville A. Establishing cross-border spatial planning. *European Territorial Cooperation: Theoretical and Empirical Approaches to the Process and Impacts of Cross-Border and Transnational Cooperation in Europe*. 2018. P. 229–244. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-74887-0>
11. Blatter J. From “Spaces of Place” to “Spaces of Flows”? Territorial and functional governance in cross-border regions. *International Journal of Urban and Regional Research*. 2004. Vol. 28, No. 3. P. 530–548. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.0309-1317.2004.00534.x>
12. Beck J. Open government and cross-border cooperation: perspectives for the context of transnational policy-making in border regions. *Central and Eastern European eDem and eGov Days*. 2021. P. 141–159. DOI: <https://doi.org/10.24989/ocg.v341.10>
13. Interreg Europe. URL: <https://www.interreg-europe.eu/> (дата звернення: 06.03.2026).
14. Klatt M., Herrmann H. Half empty or half full? Over 30 years of regional cross-border cooperation within the EU: Experiences at the Dutch–German and Danish–German border. *Journal of Borderlands Studies*. 2011. Vol. 26, No. 1. P. 65–87. DOI: <https://doi.org/10.1080/08865655.2011.590289>
15. Medeiros E. Should EU cross-border cooperation programmes focus mainly on reducing border obstacles? *Documents d'Anàlisi Geogràfica*. 2018. Vol. 64, No. 3. P. 467–491. URL: <https://repositorio.iscte-iul.pt/handle/10071/16932> (дата звернення: 06.03.2026).
16. Волкова Н. Транскордонне співробітництво України з країнами ЄС в умовах російсько-української війни. *Економіка та суспільство*. 2023. № 48. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-48-52>
17. Круглашов А., Сабаш Н. Транскордонне співробітництво в умовах повномасштабної війни в Україні: гуманітарні та безпекові виміри. *Медіафорум: аналітика, прогнози, інформаційний менеджмент*. 2024. № 14. С. 35–58. DOI: <https://doi.org/10.31861/mediaforum.2024.14.35-58>
18. United Nations. *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. URL: <https://sdgs.un.org/2030agenda> (date of access: 11.03.2026).
19. Про ратифікацію Конвенції про оцінку впливу на навколишнє середовище у транскордонному контексті: Закон України від 19 березня 1999 р. № 534-XIV / Верховна Рада України. *Відомості Верховної Ради України*. 1999. № 18. Ст. 153. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/534-14#Text> (дата звернення: 11.03.2026).
20. Про міжнародне територіальне співробітництво України: Закон України від 24 квітня 2024 р. № 3668-IX / Верховна Рада України. База даних «Законодавство України». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/3668-20> (дата звернення: 24.03.2026).
21. Про засади державної регіональної політики: Закон України від 5 лютого 2015 р. № 156-VIII / Верховна Рада України. База даних «Законодавство України». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/156-19> (дата звернення: 20.03.2026).
22. Про затвердження Державної стратегії регіонального розвитку на 2021–2027 роки: Постанова Кабінету Міністрів України від 5 серпня 2020 р. № 695 / Кабінет Міністрів України. База даних «Законодавство України». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/695-2020-%D0%BF> (дата звернення: 26.03.2026).
23. Про затвердження Державної програми розвитку міжнародного територіального співробітництва на 2025–2027 роки: Постанова Кабінету Міністрів України від 12 грудня 2025 р. № 1647 / Кабінет Міністрів України. База даних «Законодавство України». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1647-2025-%D0%BF> (дата звернення: 26.03.2026).

24. Зовнішня торгівля товарами Одеської області у 2024 році / Головне управління статистики в Одеській області. Одеса, 2025. URL: https://od.ukrstat.gov.ua/infografika/Statistichne_vidannya/zovnishnya_torgivlya_v_odes_obl_2024.pdf (дата звернення: 20.03.2026).
25. Зовнішня торгівля товарами Львівської області у 2024 році: пресвипуск / Головне управління статистики у Львівській області. Львів, 2025. URL: https://lv.ukrstat.gov.ua/ukr/si/press/2025/r12_2.pdf (дата звернення: 26.02.2026).
26. Експорт-імпорт товарів Хмельницької області у січні–червні 2024 року: експрес-випуск / Головне управління статистики у Хмельницькій області. Хмельницький, 2024. URL: https://www.km.ukrstat.gov.ua/ukr/express/2024/08_2024/16.pdf (дата звернення: 15.03.2026).
27. Експорт-імпорт товарів Херсонської області у січні–жовтні 2024 року: експрес-випуск / Головне управління статистики у Херсонській області. Херсон, 2024. URL: <https://www.ks.ukrstat.gov.ua/images/stories/stat/Arhiv/express/2024/24.pdf> (дата звернення: 16.02.2026).
28. Зовнішня торгівля України товарами: підсумки 2024 року / Національний інститут стратегічних досліджень. URL: <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/mizhnarodni-vidnosyny/zovnishnya-torhivlya-ukrayiny-tovaramy-pidsumky-2024-roku> (дата звернення: 16.02.2026).
29. LeNetEco 2. *Establishment of Learning Network for the Consolidation Effort of Joint Environmental Control and Monitoring in the Black Sea Basin 2*. URL: <https://leneteco2.univ-danubius.ro/en/> (date of access: 16.03.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 27.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

РЕКУЛЬТИВАЦІЯ ТА ФІТОРЕМЕДІАЦІЯ У СИСТЕМІ ЛАНДШАФТНО-ЕКОЛОГІЧНОЇ РЕАБІЛІТАЦІЇ ТЕХНОГЕННО ТРАНСФОРМОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ

Зеленчук І.Д., Сонько С.П.

Уманський національний університет

вул. Інститутська, 1, 20300, м. Умань

zelenchuk.id@gmail.com

У статті представлено інтегрований підхід до рекультивації та фітореємедіації техногенно трансформованих територій, спрямований на відновлення структурно-функціональної організації антропогенно змінених ландшафтів. Проаналізовано комплексні наслідки будівельної та гірничодобувної діяльності, що проявляються у трансформації ґрунтового покриву та морфоскульптури рельєфу, зміні водного режиму і дестабілізації біогеохімічних циклів. Встановлено, що техногенно змінені території характеризуються критичним ослабленням механізмів природної саморегуляції, та суттєвим уповільненням процесів автогенного сингенезу, що зумовлює формування екологічно нестійких, деградованих техногенних систем.

У роботі рекультивацію розглянуто як складний багатостадійний процес, що включає підготовчий, технічний і біологічний етапи, які є функціонально та ієрархічно пов'язані між собою. Доведено, що саме біологічний етап є визначальним для досягнення довготривалої екологічної стабільності, оскільки забезпечує ініціацію первинного педогенезу, формування стійкого фітоценотичного покриву, активізацію біогеохімічного кругообігу речовин і поступове відновлення функціональних зв'язків між компонентами ландшафту. Обґрунтовано, що фітореємедіація є не лише локальною технологією очищення ґрунтів, а складовою системного відновлення трансформованих ландшафтів. Її інтеграція у біологічний етап рекультивації сприяє зниженню міграційної активності токсичних елементів, обмеженню їх біодоступності, стабілізації поверхні техноземів і відновленню екологічних функцій едафотопу.

Узагальнено науково-практичні результати, які можуть бути використані під час розроблення проєктів комплексної рекультивації, у системах екологічного моніторингу та у практиці просторового планування. Запропоновано алгоритм обґрунтування напрямів подальшого використання рекультивованих територій з урахуванням їх ландшафтного положення, морфології поверхні та фізико-хімічних властивостей техногенних субстратів. Окрему увагу приділено ефективності відновлення функціональних зв'язків у геосистемах у посттехногенний період їх розвитку. *Ключові слова:* техногенні ландшафти, техноземи, ландшафтно-екологічна реабілітація, родючий шар ґрунту (РШГ).

Reclamation and phytoremediation in landscape-ecological rehabilitation of anthropogenically transformed landscapes. Zelenchuk I., Sonko S.

This study presents an integrated approach to the reclamation and phytoremediation of technogenically transformed territories aimed at restoring the structural and functional organization of anthropogenically altered landscapes. The complex impacts of construction and mining activities are analyzed, including transformation of the soil cover and relief morphology, changes in the hydrological regime, and destabilization of biogeochemical cycles. It is shown that technogenically altered areas are characterized by a critical weakening of natural self-regulation mechanisms and a significant slowdown of autogenic succession, which leads to the formation of ecologically unstable and degraded technogenic systems.

Reclamation is considered as a complex multi-stage process that includes preparatory, technical, and biological stages, which are functionally and hierarchically interconnected. The biological stage is shown to be a key stage for achieving long-term ecological stability, as it ensures the initiation of primary soil formation, the development of stable vegetation cover, the activation of biogeochemical cycling, and the restoration of functional relationships between landscape components. Phytoremediation is considered not only as a local soil treatment technology but also as a component of the systemic restoration of transformed landscapes. Its integration into the biological stage of reclamation contributes to reducing the mobility of toxic elements, limiting their bioavailability, stabilizing the surface of technosols, and restoring the ecological functions of the edaphotope.

The results can be used in the development of comprehensive reclamation projects, environmental monitoring systems, and spatial planning practices. An algorithm for substantiating the directions of further use of reclaimed territories is proposed, taking into account their landscape position, surface morphology, and physicochemical properties of technogenic substrates. The effectiveness of restoring functional relationships within geosystems during the post-technogenic stage of their development is demonstrated. *Key words:* technogenic landscapes, technosols, landscape-ecological rehabilitation, topsoil.

Постановка проблеми. Просторові перетворення ландшафтів унаслідок індустріального освоєння територій, розвитку гірничодобувної галузі та масштабного техногенного впливу будівельно-мон-

тажних робіт (БМР) супроводжуються фрагментацією природних комплексів, зміною напрямів міграції речовини та енергії й порушенням функціональних зв'язків між компонентами геосистем.



Такі трансформації супроводжуються формуванням антропогенних морфоскульптур і специфічних субстратів, у межах яких природні механізми саморегуляції істотно послаблюються або втрачаються. У результаті виникають ландшафтні системи з порушеними сукцесійними процесами та нестійкими екологічними режимами, що визначає необхідність цілеспрямованого відновлення їх структурно-функціональних зв'язків. Сукцесія (від лат. *successio* – спадкоємність) розглядається як послідовний і незворотний процес зміни біоценозів, що відбувається на певній території внаслідок дії природних або антропогенних чинників [1, 2].

Техногенно трансформовані території (постгірничі ландшафти, промислові майданчики, відвали, хвостосховища, зони будівельного переформування рельєфу) характеризуються не лише зміною морфології, а й утворенням специфічних ґрунтових тіл – техноземів. З позицій сучасної ландшафтно-екології техногенні ландшафти розглядаються як системи зі зміненими механізмами функціонування, у яких порушується баланс між живими та інертними компонентами. Ці ландшафти часто набувають рис «нових екосистем», що формуються під поєднаним впливом природних і антропогенних чинників та розвиваються за незворотними альтернативними траєкторіями [3].

Дослідження результатів біологічного етапу рекультивації показали, що довготривала стабільність відновлених територій досягається лише за умов відновлення ґрунтових процесів, біогеохімічних циклів і біотичних взаємодій, які визначають самопідтримуваний розвиток екосистем. У зв'язку з цим у сучасних дослідженнях дедалі більше пріоритетуються природоорієнтовані підходи до відновлення, зокрема фітореємедіація, що базується на використанні рослин для стабілізації, трансформації або вилучення забруднювачів із ґрунтового середовища [4]. Застосування рослин-аккумуляторів сприяє зниженню міграційної активності токсичних елементів, активізації ґрунтових мікробіологічних процесів і поступовому відновленню екологічних функцій техногенних територій. Водночас ефективність таких заходів значною мірою залежить від ландшафтного положення ділянок, морфології поверхні та просторової організації геосистем.

Попри значну кількість досліджень рекультивації та фітореємедіації, їх здебільшого розглядають як окремі технологічні напрями, натомість питання їх інтеграції в межах єдиної системи ландшафтно-екологічної реабілітації залишаються недостатньо розробленими [5]. За цих умов метою відновлення стає не відтворення первісного стану природного середовища, а досягнення екологічної стабільності, відновлення екосистемних функцій та мінімізація екологічних ризиків.

Для України додаткової актуальності набуває потреба у методиках, які поєднують ландшафтно-е-

кологічний аналіз із застосуванням технологій фітореємедіації та довготривалим моніторингом змін бєлігеративних ландшафтів, що характеризуються підвищеним рівнем екологічних ризиків.

Актуальність дослідження. Актуальність дослідження зумовлена зростанням площ техногенно трансформованих територій, що формуються внаслідок інтенсивного будівництва в умовах релокації промислових, виробничих і складських потужностей у відносно безпечні регіони України. Особливої актуальності цій тематиці додає динамічна розбудова інженерних мереж, необхідних для забезпечення функціонування релокованих виробничих об'єктів. Інтенсифікація будівельної діяльності призводить до вилучення під забудову значних земельних площ, формування техногенних поверхонь та концентрації антропогенного навантаження в межах раніше відносно стабільних природних ландшафтів, що супроводжується зміною їх структурно-функціональної організації [6]. За цих умов рекультивація, інтегрована з фітореємедіаційними заходами, розглядається як інструмент екологічної реабілітації, спрямований на відновлення ґрунтових функцій, зниження міграційної активності забруднювачів та відновлення взаємодії інертних і живих компонентів геосистем [4, 7, 8].

Відновлення техногенно трансформованих земель у сучасній науковій парадигмі пов'язується з інтеграцією екологічних, біологічних і географічних аспектів, оскільки ґрунти техногенного генезису часто характеризуються накопиченням сполук фтору, цинку, кобальту, арсену, інших важких металів і радіонуклідів, що становить ризик для здоров'я населення та функціонування біоценозів [6, 7]. У ландшафтно-екологічному вимірі відновлення техногенних територій повинно забезпечувати реконструкцію структурно-функціональної організації геосистем, зокрема нормалізацію ґрунтових процесів, стабілізацію біогеохімічних циклів і відновлення порушених зв'язків між компонентами ландшафту [2, 4].

У міжнародних програмах сталого розвитку та екологічної безпеки проблема реабілітації техногенних екосистем розглядається як складова глобальних ініціатив зі зменшення антропогенного впливу на довкілля та відновлення порушених територій [9]. Саме тому, актуальність дослідження полягає у науковому обґрунтуванні інтеграції рекультиваційних і фітореємедіаційних заходів з метою формування цілісної моделі реабілітації техногенно трансформованих територій, яка поєднує відновлення біопродуктивності, зниження екологічних ризиків та гармонізацію техногенних ландшафтів у структурі екологічно стабільного простору.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Авторський доробок безпосередньо пов'язаний із сучасними науковими завданнями ландшафтно-екології та гео-

екології, зокрема з концепцією нейтрального рівня деградації земель Land Degradation Neutrality (LDN), у межах цілі SDG 15.3. Ця концепція спрямована на запобігання втраті біопродуктивності ґрунтового покриву, забезпечення збалансованого управління земельними ресурсами задля забезпечення продовольчої безпеки та пом'якшення наслідків зміни клімату [9].

Одним із ключових пріоритетів є стратегічне завдання до 2030 року зупинити втрату продуктивних земель і відновити деградовані території, що передбачає нормалізацію ґрунтових процесів, зниження міграційної активності токсикантів, відновлення біогеохімічних циклів для досягнення їх довготривалої функціональної стійкості. Представлена робота спрямована на поглиблення уявлень про механізми взаємодії між компонентами техногенно трансформованих ландшафтів і формування науково обґрунтованих підходів до їх відновлення.

Узагальнюючи викладене, результати дослідження співвідносяться з науковими та прикладними завданнями рекультивації деградованих земель і забезпечення екологічної стійкості територій, поєднуючи підходи ландшафтно-екології, геоекології та просторового планування. Отримані результати формують теоретико-методичне підґрунтя для оцінювання змін структурно-функціональної організації територіальних комплексів і розроблення природоорієнтованих заходів щодо відновлення техногенно трансформованих ландшафтів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Рекультивация та фіторе mediaція порушених земель і відновлення їх продуктивності розглядаються у сучасній науковій літературі як багаторівнева проблема відновлення функцій геосистем, що виходить за межі суто інженерної стабілізації поверхні. Незважаючи на значний обсяг наукових праць, присвячених цій проблематиці, у науковій літературі досі не сформовано єдиного підходу до трактування сутності рекультиваційних процесів, методів і способів виконання рекультиваційних робіт. У практиці природокористування, зокрема в Україні, рекультиваційні заходи часто розглядаються переважно з позицій технічного відновлення територій, що передбачає інженерну підготовку, вирівнювання поверхні порушених земель та подальше формування нових техногенних ландшафтів. У дослідженні [4] автор детально аналізує сутність технічного та біологічного етапів рекультивації, приділяючи особливу увагу методологічним аспектам проведення рекультиваційних робіт на порушених землях, які формуються внаслідок будівництва інженерних трубопроводних мереж.

Одним із фундаторів теоретичних засад у галузі рекультивації порушених земель є професор, ґрунтознавець, доктор сільськогосподарських наук Р. М. Панас. У своїй фундаментальній праці [10] учений системно викладає науково-теоретичні основи

рекультивації, розкриває сутність та зміст гірничо-технічного і біологічного етапів відновлення порушених земель, а також обґрунтовує принципи виконання рекультиваційних заходів для різних видів техногенно трансформованих територій спрямованих на формування стійких антропогенних ландшафтних систем.

Теоретичну основу цього дослідження становлять праці доктора географічних наук Є. А. Іванова, присвячені прикладним аспектам рекультивації земель, порушених гірничодобувною діяльністю. У зазначених публікаціях автором проаналізовано геоекологічні наслідки видобування і збагачення корисних копалин, а також систематизовано досвід рекультивації порушених земель у різних гірничих регіонах [11, 12].

Важливим для нашого дослідження є окремий напрям наукових досліджень, пов'язаний із застосуванням біологічних методів відновлення порушених земель, зокрема фітомеліорації та фіторе mediaції. Вагомий внесок у цю галузь зробив український професор М. М. Харитонов. У своїх працях учений аналізує фітомеліоративні властивості рослин, здатних зростати на техногенних субстратах, та обґрунтовує, що використання природних видів рослин сприяє поліпшенню фізико-хімічних властивостей ґрунтів і формуванню стійких екосистем на рекультивованих територіях [13].

Науковою основою дослідження є праці інших українських дослідників проблем фіторе mediaції техногенно забруднених ґрунтів [14], у яких висвітлено особливості антропогенної трансформації ґрунтового покриву під впливом важких металів, пестицидів та нафтопродуктів. Автори проаналізували можливості використання енергетичних культур як ефективного засобу фіторе mediaції, що сприяє відновленню деградованих ґрунтів і підвищенню їх агрономічної цінності.

Суттєвий внесок у формування сучасної наукової концепції фіторе mediaції зробили американські вчені D. E. Salt, R. D. Smith та I. Raskin, у працях яких було закладено теоретичні та методологічні основи використання рослин для очищення забруднених ґрунтів [15]. У роботі доведено здатність окремих видів рослин акумулювати значні концентрації токсичних елементів, що обґрунтовує доцільність фіторе mediaції як перспективного екологічного підходу до відновлення техногенно забруднених ґрунтів і вод на основі фізіолого-біохімічних механізмів поглинання, накопичення та трансформації поллютантів.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. У цій статті продовжується пошук можливих варіантів розв'язання задачі відновлення зв'язків між інертними та живими компонентами ландшафту, порушених у результаті будівельної діяльності.

Попередні дослідження автора та його наукового керівника дали змогу окреслити головні напрями

впливу будівельної діяльності на ландшафтні системи, серед яких найбільш істотними є механічне переміщення та ущільнення ґрунтів, трансформація морфоскульптури рельєфу, зміна водного режиму, а також фрагментація природних екосистем [16]. Разом із тим, у сучасній літературі ці процеси переважно досліджуються ізольовано, у межах окремих підходів та дисциплін, тоді як питання відновлення взаємодії між компонентами ландшафту залишаються малодослідженими. Аналіз сучасних наукових досліджень з рекультивації свідчить, що основний акцент у них зроблено на технічних і гірничотехнічних етапах відновлення порушених земель, а саме на плануванні поверхні, переміщенні непридатних субстратів, створенні техноземів, однак на важливості належного виконання біологічного етапу рекультивації акценти не ставляться [11, 12]. Такий підхід є методично виправданим на початкових стадіях рекультивації, однак він не забезпечує повного розкриття питання відновлення внутрішніх зв'язків між літогенною основою, ґрунтовим покривом, рослинністю та супутніми біотичними компонентами. Водночас в основоположних працях присвячених рекультивації наголошено на необхідності поєднання технічного і біологічного етапів, але проблема аналітичної оцінки результатів їхнього спільного впливу на відновлення ландшафтно-цілісності все ще залишається недостатньо дослідженою та проаналізованою.

Не менш показовою є ситуація у сфері фітореємедіації. У фундаментальних і сучасних дослідженнях цей напрям обґрунтовується як ефективний спосіб зниження токсичного навантаження на ґрунти за рахунок використання рослин та асоційованих із ними мікроорганізмів. У науковій літературі достатньо ґрунтовно розкрито механізми фітоекстракції, фітостабілізації, ризофільтрації, фітодеградації та фітовипаровування, а також показано залежність їх ефективності від типу забруднювача, біологічних властивостей рослин і фізико-хімічного стану субстрату. Водночас переважна більшість таких робіт зосереджена на фізіолого-біохімічних або агроекологічних аспектах процесу, тоді як ландшафтно-екологічний ефект фітореємедіації, тобто її роль у відновленні порушених зв'язків між інертними й живими компонентами ландшафту, висвітлено в значно меншому обсязі. Відповідно, фітореємедіація часто розглядається як самодостатня технологія очищення середовища, а не як складова ширшої системи екологічної реабілітації ландшафту [14, 15].

У межах виконання цього дослідження уточнено зміст поняття фітореємедіації. Під *фітореємедіацією* у роботі розуміється науково обґрунтована система біотехнологічних заходів, що базується на використанні рослин для видалення, акумулювання, трансформації або стабілізації токсичних речовин у ґрунтах.

Підсумовуючи, зауважимо, що наявні дослідження створили важливу теоретичну й прикладну основу для розуміння окремих проявів деградації природних ландшафтів та механізмів їх подолання, проте питання відновлення порушених зв'язків між інертними і живими компонентами ландшафту як єдиної функціональної системи залишається недостатньо розробленим. Саме на розв'язання цієї наукової проблеми й спрямовано означену статтю.

Новизна. Наукова новизна дослідження полягає в обґрунтуванні ефективності поєднання рекультиваційних і фітореємедіаційних заходів для відновлення функціональних зв'язків між інертними та живими компонентами техногенно трансформованих ландшафтів. У роботі показано визначну роль біологічного етапу рекультивації у стабілізації техноземів та відновленні ґрунтових процесів, які сприяють формуванню рослинного покриву й активізації біогеохімічних циклів у межах техногенно змінених ландшафтів.

Обґрунтовано доцільність застосування фітореємедіаційних технологій як складової ландшафтно-екологічної реабілітації територій, порушених будівельною діяльністю.

Подальшого розвитку набули наукові підходи до трактування фітореємедіації як системного інструменту регенерації техногенно трансформованих ландшафтів, а не лише як локальної технології очищення ґрунтів.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічне значення дослідження полягає в уточненні наукових уявлень про відновлення територій, змінених будівельним впливом, та про значення взаємодії інертних і живих компонентів ландшафту у цьому процесі. У роботі показано, що результати рекультивації та фітореємедіації доцільно інтерпретувати не лише як технічне відновлення поверхні або формування техноземів, а як процес відновлення взаємодії літогенної основи, ґрунтового покриву та рослинності.

Загальнонаукове значення роботи полягає у конкретизації уявлень про механізми стабілізації ландшафтів, трансформованих будівельною діяльністю. Це дозволяє розглядати рекультиваційні та фітореємедіаційні заходи як інтегровані процеси, спрямовані на відновлення геосистем у контексті поновлення структурно-функціональної організації зміненого ландшафту.

Виклад основного матеріалу. Будівельна діяльність, навіть за умов дотримання високих екологічних вимог і використання інноваційних технологій, супроводжується трансформацією природних компонентів ландшафту та формуванням техногенно змінених ландшафтних комплексів. Особливо це характерно для промислового та інфраструктурного будівництва, де застосування швидкокомтованих будівель із залізобетонними каркасами та прокладання значної кількості підземних інженерних

комунікацій супроводжується значними обсягами земляних робіт. У процесі таких робіт відбуваються зміни літогенної основи, порушується морфологічна скульптура рельєфу, трансформується ґрунтовий покрив, змінюється водний режим території, а також зазнають впливу повітряне середовище та біотичні компоненти ландшафту.

В Україні земельні ресурси належать до найбільш цінних компонентів природного середовища, однак проблема відновлення порушених земель досі залишається недостатньо вирішеною. У багатьох випадках рекультиваційні заходи здійснюються в обмеженому обсязі або через брак фінансових ресурсів реалізуються лише частково, що призводить до втрати родючого шару ґрунту та виведення значних площ земель із господарського використання. Відповідно до ст. 1 Закону України «Про охорону земель» рекультивації підлягають усі землі, у межах яких у результаті гірничодобувних, будівельних, гідротехнічних, інженерних та інших видів робіт відбулися зміни структури рельєфу, ґрунтового покриття або водного режиму [17].

Відповідно до Земельного кодексу України, рекультивація порушених земель визначається як комплекс організаційних, технічних і біотехнологічних заходів, спрямованих на відновлення ґрунтового покриття, поліпшення стану та продуктивності порушених земель [18]. До складу біотехнологічних заходів належать біологічні та біогеохімічні способи відновлення ґрунтового середовища, а також методи ремедіації, що базуються на використанні живих організмів або продуктів їх життєдіяльності з метою відновлення ґрунтових процесів, зниження токсичності субстрату та формування рослинного покриття.

Тема рекультивації порушених земель та регенерації ґрунтового покриття посідає важливе місце

в сучасних дослідженнях раціонального використання природних ресурсів. Особливе значення ця проблематика набуває у зв'язку з необхідністю ревіталізації продуктивних властивостей земель, які зазнали змін унаслідок інтенсивного будівельно-індустріального освоєння [19]. У сучасних зарубіжних екологічних дослідженнях зазначені процеси розглядаються в межах концепції екологічного відтворення (ecological restoration), яка передбачає комплексне відновлення екосистемних функцій, структури середовища та здатності біогеоценозів підтримувати природні процеси [20]. Окрім того зарубіжні учені довели існування специфічної групи представників флори – гіперакумуляторів важких металів. До цієї категорії належать рослини, що характеризуються високою толерантністю до екстремальних концентрацій важких металів у субстраті та здатністю до інтенсивної біоаккумуляції цих елементів у вегетативній масі без проявів морфологічних чи фізіологічних ознак фітотоксичності. У цьому контексті відновлення деградованих територій інтерпретується не як повне повернення до первісного стану, а як формування стабільних ландшафтних систем, здатних функціонувати в змінених природно-техногенних умовах.

До об'єктів рекультивації належать земельні ділянки, що вилучаються у тимчасове користування для облаштування будівельних майданчиків, прокладання інженерних комунікацій або здійснення іншої господарської діяльності, пов'язаної з механічною деструкцією ґрунтового покриття. Типова технологічна схема зняття та тимчасового складування РШГ під час виконання земляних робіт представлена на рис. 1. Одним із основних технологічних прийомів рекультивації є використання РШГ, що вилучається під час виконання будівельних та інших видів робіт. Такий ґрунт застосовується для нанесення на

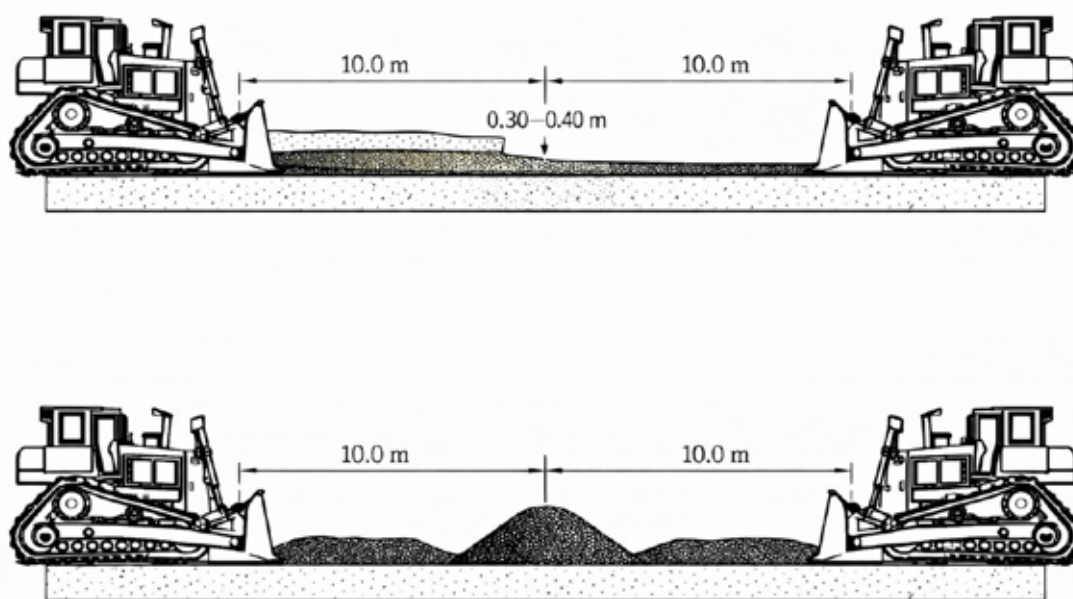


Рис. 1. Технологічна схема зняття та тимчасового складування родючого шару ґрунту (РШГ) [4]

малопродуктивні або позбавлені ґрунтового покриву ділянки, що забезпечує формування сприятливих умов для подальшого відновлення їх екологічних і господарських функцій.

Розрізняють три етапи рекультивації: підготовчий, технічний та біологічний. Ефективність рекультивації значною мірою визначається послідовністю виконання її етапів та їх функціональною взаємопов'язаністю у процесі відновлення порушених ландшафтів. У цьому контексті доцільно розглядати рекультивацію як багатостадійний процес, що охоплює підготовчий, технічний і біологічний етапи. Систематизовану авторську характеристику зазначених етапів, їх функціональне призначення, основні заходи та критерії оцінювання ефективності рекультивації узагальнено у табл. 1.

Для розроблення проєкту рекультиваційних заходів необхідні такі вихідні дані:

- нормативно-правова база, зокрема чинне земельне та лісове законодавство України;
- галузеві нормативи відведення територій під будівництво об'єктів інфраструктури та інженерних мереж;
- результати комплексних інженерно-екологічних та геодезичних вишукувань;
- схеми монтажу повітряних ліній та підземних інженерних мереж;
- проєкт виконання робіт.

Технічний етап рекультивації. Узагальнений алгоритм технічного етапу відновлення порушених земель передбачає такі основні операції:

- вилучення родючого шару ґрунту (РШГ) з усієї смуги виконання робіт та його транспортування до місць тимчасового зберігання (буртів), рис. 1;
- геометричне планування рекультиваційної смуги, що включає нівелювання мікрорельєфу, засипку будівельних понижень та виїмок, рис. 2;
- прибирання території від залишків будівельних матеріалів та відходів;

– повернення РШГ на підготовлену поверхню, фінішне планування та облаштування систем водо-відведення, дренажування.

Біологічний етап рекультивації з фіторемедіаційними заходами. Біологічний етап рекультивації спрямований на відновлення родючості порушених земель і реалізується після завершення технічної рекультивації. Його основним завданням є створення умов для відновлення ґрунтоутворних процесів, стабілізації рослинного покриву та поступового відновлення функціонально-обмінних властивостей ґрунту, що забезпечує формування стійкого біогеоценозу. На цьому етапі здійснюється комплекс агро-технічних, меліоративних і ремедіаційних заходів, спрямованих на зниження вмісту токсичних елементів у ґрунті, відновлення продуктивного потенціалу ґрунтів і забезпечення можливості подальшого господарського використання рекультивованих земель.

Важливим складником біологічної рекультивації є фіторемедіаційні заходи, що передбачають використання рослин-аккумуляторів, здатних вилучати, трансформувати або стабілізувати забруднювальні речовини у ґрунтовому середовищі, сприяючи зниженню рівня техногенного забруднення та відновленню екологічних функцій ґрунтів. Основні методи фіторемедіації забруднених ґрунтів та їх характеристики узагальнено у табл. 2.

Як уже було зазначено, методи фіторемедіації є складовою біологічного етапу рекультивації порушених земель, зокрема промислових і будівельних майданчиків, земель відведених під прокладання інженерних комунікацій, а також територій, забруднених унаслідок бойових дій. Для реалізації фіторемедіаційних заходів в Україні, доцільно використовувати рослини, адаптовані до природно-кліматичних умов території та здатні до акумуляції або трансформації забруднювачів.

Для очищення водного середовища застосовують очерет (*Phragmites australis*), та погіз (*Typha latifolia*).

Таблиця 1.

Етапи рекультивації порушених земель та їх наукова характеристика

Етап рекультивації	Екологічний результат етапу	Критерії оцінювання ефективності
<i>Підготовчий:</i> діагностика ступеня порушення земель, аналіз рельєфу, ґрунтових і гідрологічних умов, оцінка придатності техногенних субстратів до біологічної рекультивації, визначення напрямку та технології рекультивації	Визначення напрямку рекультивації, розроблення проєкту відновлення порушеної території	Відповідність проєктних рішень нормативним вимогам
<i>Технічний:</i> планування поверхні, формування укосів, зняття, складування та повернення родючого шару ґрунту, виконання дренажних, протиерозійних та інших інженерно-захисних робіт	Сформовано стабільний техногенний рельєф і субстратний покрив, придатний для біологічного оновлення.	Стійкість рельєфу, наявність шару ґрунту придатного для укорінення рослин та фіторемедіації
<i>Біологічний:</i> формування рослинного покриву, внесення органічних і мінеральних добрив; посів трав, фіторемедіаційні заходи, оптимізація видового складу рослинності	Відновлення ґрунтових процесів, формування стійкого біогеоценозу	Стабілізація біогеохімічних циклів, відновлення взаємозв'язків між компонентами ландшафту

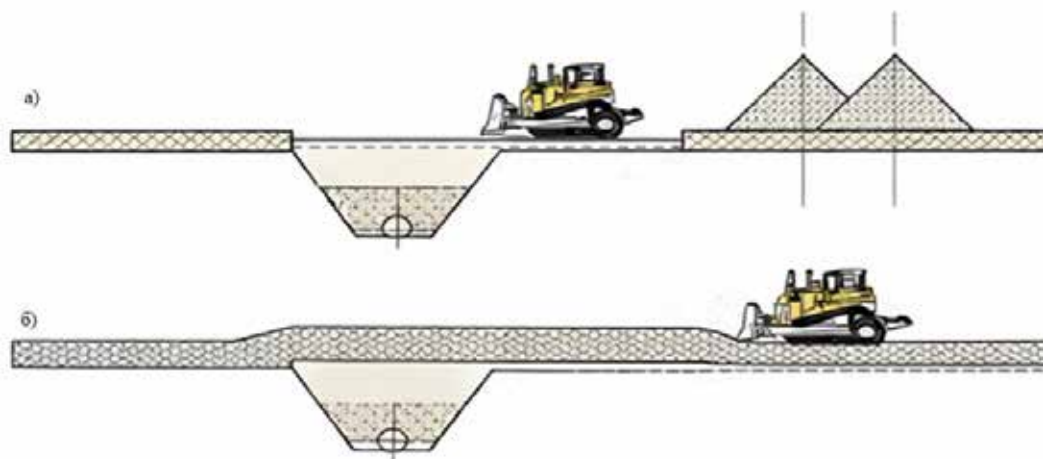


Рис. 2. Послідовність технічної рекультивації земель після прокладання інженерних комунікацій [4].

а – порушений ґрунтовий профіль після виконання БМР; б – відновлений ґрунтовий профіль після засипання траншеї, повернення РШГ та планування поверхні.

Таблиця 2.

Основні механізми фіторе mediaції забруднених ґрунтів та приклади рослин-гіперакумуляторів [21]

Метод фіторе mediaції та його характеристика
Фітостабілізація: Полягає в іммобілізації токсичних елементів у ґрунтовому середовищі шляхом їх сорбції кореневою системою рослин та фіксації у ризосфері. У результаті забруднювачі переходять у малорухомі форми, що обмежує їх міграцію у ґрунтово-водній системі та знижує ризик вторинного забруднення. До рослин, здатних до стабілізації та акумуляції металів, належать <i>Miscanthus giganteus</i> (As, Pb, Zn, Co, Ni, V, Mn,) та <i>Chenopodium quinoa</i> Willd. (Cd, Cu)
Фітоекстракція: Передбачає поглинання рослинами розчинних форм важких металів та інших токсичних елементів із ґрунту з подальшим їх перенесенням у надземні частини. Після завершення вегетаційного циклу надземна біомаса вилучається з ділянки, що забезпечує поступове зменшення концентрації забруднювачів у ґрунті. До ефективних рослин-аккумуляторів належать <i>Brassica juncea</i> L. (Cd, Zn, Pb), <i>Fagopyrum esculentum</i> Moench (Pb, Cd, Zn)
Ризофільтрація: Передбачає вилучення забруднювачів із ґрунтового середовища шляхом адсорбції та акумуляції їх кореневою системою рослин. У зоні ризосфери відбувається зв'язування металів та органічних токсикантів, що сприяє зниженню їх біодоступності у ґрунті. Для таких процесів можуть використовуватись рослини з високою здатністю до акумуляції металів, зокрема <i>Pisum sativum</i> L. та <i>Chenopodium quinoa</i> Willd.

Для вилучення важких металів із ґрунту використовуються соняшник (*Helianthus annuus*), гірчиця (*Brassica juncea*) та ріпак (*Brassica napus*). Для рекультивації техногенно порушених територій ефективними є швидкорослі енергетичні деревні породи, зокрема верба (*Salix* spp.) і тополя (*Populus* spp.).

Результатом рекультиваційних робіт має бути формування екологічно стабільного та функціонально збалансованого ландшафтного комплексу.

У цьому контексті важливе значення має застосування ландшафтно-екологічного підходу, який передбачає врахування природних умов і структурно-функціональних особливостей території. Такий підхід дає змогу обґрунтовано визначити напрями подальшого використання рекультивованих земель, зокрема для формування сільськогосподарських угідь, створення лісових насаджень або організації рекреаційних територій.

Головні висновки. У дослідженні засвідчено, що техногенна трансформація територій унаслідок будівельної, інженерної та гірничодобувної діяльності зумовлює комплексні зміни морфоскульптури рельєфу, водного режиму та порушення структурно-функціональної організації ландшафтів.

Обґрунтовано, що рекультивація є багатостадійним, ієрархічно організованим процесом, у якому підготовчий, технічний і біологічний етапи є функціонально взаємопов'язаними.

Встановлено, що біологічний етап рекультивації є визначальним для досягнення довготривалої екологічної стабільності відновлених земель, оскільки саме на цій стадії забезпечується відновлення ґрунтоутворних процесів, активізація біогеохімічних циклів і формування стійкого рослинного покриву. Доведено доцільність інтеграції фіторе mediaційних заходів у систему біологічної рекультивації,

що забезпечує зниження вмісту важких металів та інших токсичних елементів у ґрунтовому середовищі. Отримані результати підтверджують ефективність поєднання рекультиваційних і фіторемедіаційних заходів у системі ландшафтно-екологічної реабілітації техногенно трансформованих територій.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати формують наукову основу для підвищення ефективності рекультиваційних і фіторемедіаційних заходів на основі їх поєднання при відновленні техногенно трансформованих територій. Їх практичне застосування можливе під час розроблення проєктів рекультивації, зокрема при обґрунтуванні повноти біологічного етапу, виборі

рослинного компоненту та оцінюванні результативності відновлення ґрунтового середовища.

Результати можуть бути використані в системах екологічного моніторингу для оцінювання динаміки ґрунтових процесів і відновлення функціональних зв'язків у геосистемах, а також у практиці просторового планування для визначення напрямів подальшого використання рекультивованих територій [22].

Подальші дослідження доцільно спрямувати на апробацію запропонованих підходів у конкретних природно-географічних умовах, зокрема на різних типах техногенно трансформованих територій, а також на оцінювання ефективності поєднання рекультиваційних і фіторемедіаційних заходів.

Література

1. Turner M. G. Landscape ecology: what is the state of the science? *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. 2005; Vol. 41, p. 319-344. DOI: 10.1146/annurev.ecolsys.36.102003.152614
2. R. T. T. Forman, R. D. Deblinger. The Ecological Road-Effect Zone of a Massachusetts (U.S.A.) Suburban Highway. *Conservation Biology*. 2000; Vol. 14, No. 1, p. 36-46. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2000.99088.x>
3. Гродзинський, М. Д. Еволюція ландшафтів України: ландшафтознавчо-географічний вимір проблеми: монографія. Київ: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2023, 432 с.
4. Зеленчук І. Відновлення ґрунтів та екосистем після будівництва: рекультивація як важливий інструмент відновлення взаємодії між інертними та живими компонентами ландшафту. *Norwegian Journal of Development of the International Science*. 2024. № 134. С. 17-21. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.11639772>
5. Борецька І. А. Фіторемедіація техногенно забруднених ґрунтів з використанням енергетичних культур. *Екологічні науки*. 2021. № 6(39). С. 72-76 DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.6-39.11>
6. Сонько С. П., Зеленчук І. Д. Вплив будівництва на ландшафти лісостепової зони України. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2024. Вип. 42. С. 24-34. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2024-42-02>
7. Романюк О. І., Борецька І. Ю., Шевчик Л. З., Ощеповський І. В. Розробка фіторемедіаційних композицій для очистки ґрунтів, забруднених нафтою та її похідними. *Екологічні науки*. 2022. № 4(43). С. 94-99 DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.4-43.15>
8. Ali H., Khan E., Sajad M. A. Phytoremediation of heavy metals – concepts and applications. *Chemosphere*. 2013. Vol. 91. p. 869–881. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>
9. United Nations Environment Programme (ed.). *Global Environment Outlook – GEO-6: Healthy Planet, Healthy People*. Cambridge: Cambridge University Press, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781108627146>
10. Панас Р. М. Рекультивація земель : навч. посіб. Вид. 2-ге, стер. Львів : Новий Світ-2000, 2007. 224 с.
11. Іванов Є. А., Андрейчук Ю. М., Книш І. Б. Ландшафтно-екологічні основи рекультивації породного терикону шахти «Візейська». *Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування* : матеріали V міжнар. наук.-практ. конф. (8-12 жовтня 2018 р., м. Трускавець). Київ : ДКЗ, 2018. Т. 2. С. 68-74. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2018.eco.2-68.74>
12. Іванов Є. А. Проблеми рекультивації і ревіталізації земель, порушених гірничими роботами. *Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування* : матеріали IV міжнар. наук.-практ. конф. : у 2 т. (6-10 листоп. 2017 р., м. Трускавець). – Київ : ДКЗ, 2017. – Т. 2. – С. 262-270. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2017.eco.2-262.270>
13. Kharytonov M. M., Babenko M. H., Mytsyk O. O., Gavryushenko O. O., Pashova V. T., Martynova N. V. Physical-chemical and biological testing of phytomeliorated rocks of the Pokrov land reclamation station. *Agrology*. 2018. Vol. 1, No. 3. p. 300-305. DOI: <https://doi.org/10.32819/2617-6106.2018.13010>
14. Борецька І. Ю., Джура Н. М., Романюк О. І. Фіторемедіація техногенно забруднених ґрунтів з використанням енергетичних культур. *Екологічні науки*. 2021. № 6(39). С. 72-76. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.6-39.11>
15. Salt D. E., Smith R. D., Raskin I. Phytoremediation. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*. 1998. Vol. 49. p. 643-668. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.49.1.643>
16. Зеленчук І. Д. Ландшафтно-геохімічна деструкція територій інтенсивного будівництва. *Acta Academiae Beregsiensis: Geographica et Recreatio*. 2025. № 3. С. 28-40. DOI: <https://doi.org/10.32782/2786-5843/2025-3-3>
17. Закон України від 19.06.2003 № 962-IV. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/962-15> (дата звернення: 17.03.2026).
18. Земельний кодекс України : Закон України від 25 жовт. 2001 р. № 2768-III. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14> (дата звернення: 17.03.2026).
19. Лісова Т. В. Рекультивація земель як основний захід їх відновлення. *Право і суспільство*. 2017. № 5, ч. 1. С. 119-125. http://pravoisusilstvo.org.ua/archive/2017/5_2017/part_1/22.pdf (дата звернення: 17.03.2026).
20. Калє О. В. Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи. *Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції*. Львів : ЛДУБЖД, 2021. 156 с. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.4-43.15> (дата звернення: 17.03.2026).

21. Melnychenko, V. Phytoremediation of soils contaminated as a result of military and anthropogenic impact. *Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*. 2024. 20(4), с. 72-84. DOI: <https://doi.org/10.31548/dopovidi/3.2024.72> (дата звернення: 17.03.2026)
22. Зеленчук І. Д. Еколого-геоморфологічні трансформації інертних компонентів ландшафту індустриальних зон. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2025. Вип. 44. с. 132-146. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2025-44-10>

Дата першого надходження статті до видання: 23.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

STUDY OF KINETIC PARAMETERS OF CATALYTIC ADDITIVE OXIDATION OF CARBON MONOXIDE

Kuznietsov S.I., Bezpalchenko V.M., Semenchenko O.O., Ivkina Ye.S.

Kherson National Technical University

Instytutska St. 11, 29016, Khmelnytskyi

ksiekol@gmail.com, bezpalchenkov@ukr.net, oksana.semenchenko@gmail.com, liza_ivkina@ukr.net

The article considers a pressing environmental problem – the purification of gas emissions of thermal power plants from carbon monoxide. The relevance of the study is due to the growth of carbon monoxide emissions and its harmful effects on human health and the environment. The currently known carbon monoxide secondary oxidation catalysts cannot be used for the sanitary purification of large volumes of gases due to the need to use precious metals for their manufacture, as well as high energy costs during operation. For the effective purification of exhaust gases from carbon monoxide, copper-manganese catalysts have been synthesized and studied. In addition to catalytically active substances, they use cement, aluminum powder and ammonia water. Thanks to these ingredients, a porous pasty mass of the catalyst is formed, which is applied to the inner surface of the catalytic reactor tubes. The developed catalysts are characterized by high activity, selectivity, mechanical and thermal stability. They have low cost, low hydraulic resistance, low ignition temperature and are not susceptible to catalytic poison. The technology of catalyst manufacturing does not require the use of scarce raw materials and complex equipment. The work studies the kinetics of the reaction, determines and investigates the main parameters that make it possible to provide a comprehensive assessment of the developed catalysts. Determination of the kinetic parameters of the reaction made it possible to establish the dependence of the reaction rate on the change in the concentration of each reactant, calculate the time of carbon monoxide conversion and determine the slowest stage of the process. The studied catalysts begin to show activity already at a temperature of 150°C, and the maximum values are reached at a temperature of 300°C. The synthesized tubular catalysts show higher activity than the industrial low-temperature catalyst LTK-4. The presence of water vapor in the gas does not reduce the activity of the proposed catalysts. *Key words:* kinetic parameters, carbon monoxide oxidation, copper-manganese catalysts.

Дослідження кінетичних параметрів каталітичного доокиснення монооксиду карбону. Кузнецов С.І., Безпальченко В.М., Семенченко О.О., Івкіна Є.С.

У статті розглянуто актуальна екологічна проблема – очищення газових викидів теплоенергетичних підприємств від монооксиду карбону. Актуальність дослідження зумовлена зростанням обсягів викидів монооксиду карбону та його пагубним впливом на здоров'я людини й стан навколишнього середовища. Відомі на сьогодні каталізатори доокислення монооксиду карбону не можуть використовуватись для санітарного очищення великих обсягів газів у зв'язку з потребою використовувати коштовні метали для їх виготовлення, а також з великими енергетичними витратами при експлуатації. Для ефективного очищення відхідних газів від монооксиду карбону синтезовано і досліджено мідно-марганцеві каталізатори. В них крім каталітично активних речовин, використані цемент, алюмінієва пудра та аміачна вода. Завдяки цим інгредієнтам утворюється пориста пастоподібна маса каталізатора, яка наноситься на внутрішню поверхню труб каталітичного реактора. Розроблені каталізатори характеризуються високою активністю, вибірковістю, механічною і термічною стійкістю. Вони мають низьку собівартість, малий гідравлічний опір, понижену температуру запалювання і несприятливість до каталітичної отрути. Технологія виготовлення каталізаторів не потребує використання дефіцитної сировини і складного обладнання. У роботі вивчено кінетику реакції, визначено й досліджено основні параметри, які дають можливість надати комплексну оцінку розробленим каталізаторам. Визначення кінетичних параметрів реакції дозволило встановити залежність швидкості реакції від зміни концентрації кожної реагуючої речовини, розрахувати час конвертування монооксиду карбону і визначити найповільнішу стадію процесу. Досліджені каталізатори починають проявляти активність вже при температурі 150°C, а максимальні значення досягаються при температурі 300°C. Синтезовані трубчасті каталізатори проявляють більш високу активність ніж промисловий низькотемпературний каталізатор НТК-4. Наявність у газі водяної пари не знижує активність запропонованих каталізаторів. *Ключові слова:* кінетичні параметри, окиснення монооксиду карбону, мідно-марганцеві каталізатори.

Problem statement. When boilers operate on liquid, solid or gaseous fuel, a number of harmful substances are emitted into the atmosphere [1, 2]. The most dangerous of which are nitrogen oxides, sulphur dioxide, carbon monoxide, and suspended solids [3-5]. The quantitative and qualitative composition of exhaust gases depends on the type of fuel, the design of the furnace and burners, as well as on the operating mode of the boilers [6]. Considering that several dozen, and sometimes hundreds of boilers operate in each city or industrial region, the absolute mass

of harmful substances emitted into the atmosphere is thousands of tons per year. In 2020, combustion processes in Ukraine's energy industries produced 202,993 tons of carbon monoxide out of 707,337 tons emitted into the air across the country as a whole [7].

Actualization. A person breathes about 20 m³ of air through their lungs every day. Even small doses of pollutants have a cumulative negative effect. Carbon monoxide has strong toxic properties, in particular, the gas interacts with haemoglobin in the blood 300 times faster



than oxygen, and its concentration of 0.32% is lethal [8]. Once in the atmospheric air, carbon monoxide is oxidized to carbon dioxide very slowly. On average, under natural conditions, such conversion can take from one to three months. Existing methods for cleaning gas emissions from carbon monoxide are often highly specialized and expensive [9]. For example, catalytic oxidation using platinum catalysts, which is widely used in automobile gasoline engines, is economically impractical for large volumes of gases [10].

Analysis of recent research and publications.

There are known methods for cleaning process gases from carbon monoxide, for example in ammonia synthesis, but these methods are not at all suitable for ecological cleaning of waste gases, because they require the use of high pressures (up to $300 \cdot 10^5$ Pa) and complex technological equipment. The most effective method for neutralizing carbon monoxide is its catalytic oxidation to carbon dioxide, because under normal conditions it is an indifferent gas [11]. The reaction of catalytic oxidation of CO with oxygen or water vapor is well studied: $\text{CO} + 1/2\text{O}_2 = \text{CO}_2$; $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + \text{H}_2$.

Allocation of previously unresolved parts of the general problem to which the specified article is devoted. Currently known methods and catalysts for carbon monoxide oxidation are not used for the sanitary purification of large volumes of gases [12, 13]. There are several reasons preventing the use of these methods. The main one is the high cost of catalysts and the high energy costs of heating gases to the ignition temperature of the catalyst, which is 200-250°C [14, 15]. In addition, the exhaust gases often contain solid impurities that poison the catalyst. Currently, the issue of effective industrial gas purification from carbon monoxide remains unresolved.

Novelty. New, relatively inexpensive catalysts have been developed and studied for the effective removal of carbon monoxide from exhaust gases from thermal power plants [16]. They are, to a certain extent, capable of solving the problem of removing carbon monoxide from large volumes of exhaust gases.

Statement of the main material. Determination of the order and rate constant of the oxidation reaction of carbon monoxide.

Determining the kinetic parameters of a reaction allows us to establish the dependence of the reaction rate on changes in the concentration of each reactant, calculate the time required to convert reactants into products, and also determine the rate-limiting stage of the process.

Four groups of catalysts, each consisting of four samples were studied. The catalysts in the first group were prepared by quenching coke in saturated ammonia solutions, heated to a temperature in the absence of air. In the second group, ammonia solutions, and were used as catalytically active substances, KMnO_4 and $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$. The catalysts of the third group were obtained on the basis of MnCO_3 and $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$. The fourth group demonstrated the highest activity. In addition to catalytically active substances, cement, aluminium powder, and ammonia water were also used. When the activator (aluminium powder) interacted with ammonia water, hydrogen was released, which facilitated the formation of a porous, paste-like catalyst mass. This paste was then applied in a thin layer to the inner surface of the pipes using a special plunger, where it hardened.

The kinetic equation for the reaction of heterogeneous oxidation of carbon monoxide on a catalyst is expressed by the equation: $U = K[C_{\text{CO}}]^n \cdot [C_{\text{O}_2}]^m$, where K – is the reaction rate constant; $C_{\text{CO}}, C_{\text{O}_2}$ – concentrations of reactants; n, m – exponents characterizing the reaction order for a given component.

To determine the reaction order and rate constant by integration, experimental data on the degree of carbon monoxide conversion as a function of the space velocity of the gas were used. Based on this, the dynamics of changes in the concentration of the reacting components over the reaction time were calculated (table 1).

The reaction rate constant is determined by substituting the concentration values CO and O_2 , at different reaction times ($\tau = 0.56$ s и $\tau = 1.4$ s) into kinetic equations of different orders. The calculation data are summarized in table 2.

The table shows that for $n = 1$ and $m = 0$, the rate constant values coincide most closely. Consequently, with excess oxygen, the catalytic oxidation reaction of carbon monoxide is first-order with respect to carbon monoxide and zero-order with respect to oxygen. The overall reaction order is unity.

With insufficient oxygen, the reaction order with respect to oxygen can be determined from the relationship:

$$n = \frac{\lg \frac{U_2}{U_1}}{\lg \frac{C_{\text{O}_2}}{C'_{\text{O}_2}}} = \frac{\lg \frac{70 \cdot 10^{-5}}{35 \cdot 10^{-5}}}{\lg \frac{2}{1}} = 1,$$

Table 1

Changes in the concentration of carbon monoxide and oxygen over time

Concentration of components $\text{g} \cdot \text{mol} / \text{dm}^3 \cdot 10^3$	Reaction time, s					
	0	0,28	0,56	0,85	1,13	1,4
C_{CO}	10,35	4,11	2,36	1,29	1,14	0,56
C_{O_2}	98,08	98,52	87,9	87,9	87,9	87,9

Table 2

Reaction rate constants calculated using kinetic equations of different orders ($t = 3000^\circ\text{C}$, $d = 30\text{ mm}$)

Reaction order			Type of kinetic equation	Speed constant, K	
General	By components			τ=0,56 s	τ=1,4 s
	A _{CO}	B _{O₂}			
0	n=0	m=0	$K_A = \frac{A_0 - A}{\tau}$	14,21·10 ⁻⁴	6,99·10 ⁻⁴
1	n=1	m=0	$K_A = \frac{1}{\tau} \cdot \ln \frac{A_0}{A}$	2,61	2,08
	n=0	m=1	$K_B = \frac{1}{\tau} \cdot \ln \frac{B_0}{B}$	0,089	0,044
2	n=0	m=2	$K_A = \frac{1}{\tau} \cdot \left(\frac{1}{A} - \frac{1}{A_0} \right)$	5880	12000
	n=0	m=2	$K_B = \frac{1}{\tau} \cdot \left(\frac{1}{B} - \frac{1}{B_0} \right)$	10	5.6
	n=1	m=1	$K_{AB} = \frac{a \cdot \ln \left[\frac{A}{A_0} \cdot \frac{B_0}{B} \right]}{\tau \cdot [b \cdot A_0 - a \cdot B_0]}$	290	448

where U_1 and U_2 – reaction rates at oxygen concentrations C_{O_2} и C'_{O_2} .

Experimental data were used to determine the reaction order with respect to oxygen. The results show that with a large excess of oxygen, the process rate is independent of its concentration in the gas mixture, while with a deficiency, it is proportional to it. Consequently, with oxygen deficiency in the gas mixture down to the stoichiometric ratio, the carbon monoxide oxidation reaction on copper-manganese catalysts proceeds according to a second-order equation.

The rate constant is expressed by the equation:

$$K_{AB} = \frac{a \cdot \ln \left[\frac{A}{A_0} \cdot \frac{B_0}{B} \right]}{\tau \cdot [b \cdot A_0 - a \cdot B_0]},$$

where “a” and “b” are the coefficients of the stoichiometric equation.

Increasing the oxygen concentration above the stoichiometric values in the reaction equation $\text{CO} + 1/2\text{O}_2 = \text{CO}_2$ reduces the overall reaction order to first. Considering that industrial gas purification processes typically proceed with excess oxygen, the first-order kinetic equation is of greater interest: $K_A = \frac{1}{\tau} \cdot \ln \frac{A_0}{A}$. This equation is used in subsequent calculations of rate constants for carbon monoxide oxidation reactions.

A more accurate value for the rate constant for the carbon monoxide oxidation reaction can be determined using experimental data over a wider time range:

Time, τ	s	0.28	0.56	0.85	1.13	1.4
Speed constant, K	s^{-1}	3,28	2,61	2,45	1,95	2,08

$$K = \frac{3,28 + 2,61 + 2,45 + 1,95 + 2,08}{5} = 2,47 \text{ s}^{-1}.$$

en the kinetic equation will take the form: $U = 2,47 \cdot \Delta C_{\text{CO}}$

The results of the reaction rate constant dependence on temperature are shown in table 3.

The mathematical dependence of the reaction rate constant on temperature is determined by solving a system of equations:

$$\ln K_{T_1} = \frac{A}{T_1} + B; \quad \ln K_{T_2} = \frac{A}{T_2} + B,$$

where

$$A = \frac{\ln \frac{K_2}{K_1}}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}} = \frac{\ln \frac{2}{0,156}}{\frac{1}{573} - \frac{1}{423}} = -4122;$$

$$B = \ln K_{T_1} - \frac{A}{T_1} = \ln 0,156 + \frac{4122}{423} = 7,886.$$

Then the dependence of the rate constant on temperature can be expressed by the equation:

$$\ln K = -\frac{4122}{T} + 7,886. \quad \text{Temperature coefficient of reac-}$$

$$\text{tion: } \ln \beta = \frac{\ln K_{T_2} - \ln K_{T_1}}{n} = \frac{\ln 2 - \ln 0,156}{15} = 0,17, \quad \text{where } \beta = 1,185.$$

Table 3

Rate constant (Kt) dependence on temperature

Temperature, °C	Carbon monoxide concentration				Degree of conversion,%	Reaction rate constant, K_t , s ⁻¹
	at the entrance		at the exit			
	%(vol)	g/mol·dm ³	% (vol)	g/mol·dm ³		
100	2	8,9·10 ⁻⁴	1,8	8,04·10 ⁻⁴	10	0,725
150	2	8,9·10 ⁻⁴	1,6	7,15·10 ⁻⁴	21	0,856
200	2	8,9·10 ⁻⁴	0,5	2,23·10 ⁻⁴	75	0,988
250	2	8,9·10 ⁻⁴	0,2	0,894·10 ⁻⁴	90	1,641
300	2	8,9·10 ⁻⁴	0,12	0,56·10 ⁻⁴	94	2

Table 4

The degree of conversion of carbon monoxide on a copper-manganese catalyst

Temperature, °C	Volumetric velocity of gas, h ⁻¹				
	5000	10000	15000	20000	25000
100	17	12	8	4	3
150	25	18	16	10	7
200	51	42	39	35	30
250	83	78	76	74	68
300	96	94	90	86	78

Knowing the dependence $K = f(T)$, we can determine the activation energy of the process:

$$E = \frac{R \ln \frac{K_{T_2}}{K_{T_1}}}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} = \frac{8,31 \ln \frac{2}{0,156}}{\frac{1}{423} - \frac{1}{573}} = 35214 \text{ J/mol}$$

The degree of carbon monoxide conversion as a function of temperature and space velocity is shown in table 4.

Evaluation of the effectiveness of copper-manganese catalysts for the further oxidation of carbon monoxide. The rate constants, temperature coefficients, and reaction order determined during a study of the reaction kinetics for the further oxidation of carbon monoxide allow for a comprehensive evaluation of the developed catalysts. As can be seen from the formulas, the relatively low temperature coefficient and activation energy values suggest that the carbon monoxide oxidation reaction on the copper-manganese catalyst occurs in the diffusion region. This is evidenced by the first-order nature of the reaction. Moreover, with excess oxygen, the rate of the process is limited by the diffusion of carbon monoxide within the catalyst pores. The mechanism of carbon monoxide oxidation on copper catalysts has been studied quite thoroughly. It is assumed that the conversion involves the cleavage of one π bond in the carbon monoxide molecule and the bonds between hydrogen and oxygen in the water molecule. The total energy of

the cleaved bonds is 1178 kJ/mol, which virtually rules out the possibility of the reaction occurring without a catalyst. During catalytic interaction, carbon monoxide removes oxygen from the catalyst, and water returns it to the catalyst, with both processes occurring simultaneously. The reaction proceeding via a fusion mechanism leads to a significant reduction in the energy barrier. This allows the process to be carried out at relatively low temperatures and high space velocities, as observed in these studies. The most effective means of accelerating processes occurring in the diffusion region (internal transport) is to reduce the catalyst grain size and use catalysts with a developed surface area, in which large pores serve as transport pathways to the highly developed surface area created by short, fine pores. Coke, as the support on which the catalyst is synthesized, fully meets these requirements.

Main conclusions. New catalysts have been synthesized and studied. They exhibit high performance, activity, selectivity, mechanical strength, and thermal stability. They also exhibit low hydraulic resistance, low ignition temperature, low production cost, and high resistance to catalytic poisons. The catalyst manufacturing technology is simple and reliable, requiring no scarce raw materials or complex equipment.

Prospects for using the research results. The developed catalysts can be used in thermal power plants (boiler houses) to purify large volumes of exhaust gases from carbon monoxide. This is regardless of the type of fuel being burned.

References

1. Бекетов В.Є., Євтухова Г.П. Джерела та процеси забруднення атмосфери. Харків, 2019. 113 с.
2. Викиди забруднюючих речовин і парникових газів в атмосферне повітря від стаціонарних джерел викидів. / Викиди речовин у вигляді суспендованих твердих частинок в атмосферне повітря від стаціонарних джерел викидів за регіонами у 2023 році С. 4. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2018/ns/vzap/arch_vzap_u.htm (дата звернення: 13.03.2026).
3. Про затвердження державних медико-санітарних нормативів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин у повітрі робочої зони : Наказ МОЗ України від 09 лип. 2024 р. № 1192 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1107-24#Text> (дата звернення: 13.03.2026).
4. Про затвердження Змін до Гігієнічних регламентів гранично допустимої концентрації та орієнтовно безпечних рівнів впливу хімічних і біологічних речовин в атмосферному повітрі населених місць : Наказ МОЗ України від 05 серп. 2021 р. № 1657. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1249-21#Text> (дата звернення: 13.03.2026).
5. Про затвердження нормативів граничнодопустимих викидів забруднюючих речовин із стаціонарних джерел : Наказ міністерства охорони навколишнього природного середовища України від 27 черв. 2006 р. № 309. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0912-06#Text> (дата звернення: 16.03.2026).
6. Разанов С.Ф., Ткачук О.П. Порівняльний аналіз викидів забруднюючих речовин у повітря традиційними енергоносіями та різними видами біопалива. *Сільське господарство та лісівництво*. 2015. № 1. С. 152–160.
7. Викиди в атмосферне повітря: Держстат проаналізував регіони та галузі за 2020 рік. Українська енергетика ua-energy.org : веб-сайт. URL: <https://ua-energy.org/uk/posts/vykydy-v-atmosferne-povitria-derzhstat-proanalizuvav-rehiony-ta-haluzi-za-2020-rik#:~:text=> (дата звернення: 30.03.2026).
8. Михайлова Є.О. Викиди карбон (II) оксиду та методи його знешкодження в умовах хімічних виробництв. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : матеріали та програма VII Всеукр. наук.-тех. конф. «СТПВ-2020», 21–24 квіт. 2020 р. Суми : СДУ, 2020. С. 228–229. <https://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/16221/1/Тези.pdf>.
9. Ліпенков І. В. Аналіз сучасних систем очищення вихідних газів у суднових енергетичних установках. *Молодий вчений. Технічні науки*. 2020. № 1(77). С. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2020-1-77-1>.
10. Методи очищення газових викидів від хімічно-небезпечних речовин для підвищення ефективності фільтрувальних систем / О. В. Галак та ін. *Вісник Національного Технічного Університету «ХПІ»*. Сер. Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів, 2018. № 18 (1294). С. 89–93. <http://idnrs.khpi.edu.ua/issue/view/8938>
11. Patel D. M., Kodgire P., Dwivedi A. H. Low temperature oxidation of carbon monoxide for heat recuperation: A green approach for energy production and a catalytic review. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 245, P. 118838–118844. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118838>.
12. Крусір Г. В., Мадані М. М., Гаркович О. Л. Техніка та технології очищення газових викидів : навч. посіб. Одеса, 2017. 207 с.
13. Каталітичне знешкодження монооксиду вуглецю печей обпалу типу рідгамера / О. І. Іваненко та ін. *Науковий Журнал Метінвест Політехніки*. Сер. Технічні науки. 2025. № 3. С. 14–25. <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-3-2>.
14. Іваненко О. І., Довголап С. Д. Застосування феритного методу для знешкодження токсичних газових відходів. *Екологічні науки*. 2023. № 2 (47). С. 228–231. doi: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.2-47.37>
15. Dey S., Dhal G. C., Prasad R., Mohan D. Effects of Doping on the Performance of CuMnOx Catalyst for CO Oxidation. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*. 2017. Vol. 12, № 3. P. 370–383. doi: <https://doi.org/10.9767/bcrec.12.3.901.370-383>.
16. Спосіб очищення відхідних газів котельних від оксиду вуглецю та пристрій для його реалізації : пат. 62855А Україна : МПК 7V01D47/00, C10K1/00. № 2003098250; заявл. 04.09.03; опубл. 15.12.2003, Бюл. № 12.

Дата першого надходження статті до видання: 31.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

УДК 574.91:001.89(477.46)

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.2-65.54>

ГРОМАДЯНСЬКА НАУКА ЯК ІНСТРУМЕНТ МОНІТОРИНГУ ІНВАЗІЙНИХ ВИДІВ (НА ПРИКЛАДІ ЧЕРКАСЬКОЇ ОБЛАСТІ)

Лаврінєнко К.В.¹, Спрягайло О.А.¹, Спрягайло О.В.¹, Гаврилюк М.Н.¹, Ілюха О.В.¹, Шевчик В.Л.²¹Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького
бульв. Шевченка, 81, 18031, м. Черкаси²Канівський природний заповідник Київського національного університету імені Тараса Шевченка
вул. Шевченка, 108, 19000, м. Канівlavrinenkokaterina97@gmail.com, biona@ukr.net, dendro@ukr.net, gavrilyuk.m@gmail.com,
ilyuhaaleksandr@gmail.com, shevwol@gmail.com

У статті показано можливості використання громадянської науки як інструменту регіонального моніторингу інвазійних чужорідних видів в умовах обмежених ресурсів традиційних методів біологічних спостережень. Розкрито актуальність залучення даних громадянської науки (citizen science) для аналізу поширення інвазійних видів в Україні на тлі фрагментарності наявної інформації та відсутності загальнодержавної системи моніторингу.

Проаналізовано результати регіонального проєкту «Інвазійні види Черкаської області», реалізованого на платформі iNaturalist у 2025 році. Наведено характеристику масиву даних, що охоплює 3885 спостережень, зафіксованих 158 учасниками, та включає 56 таксонів інвазійних видів рослин і тварин. Здійснено таксономічну уніфікацію назв із урахуванням розбіжностей між офіційним регіональним переліком інвазійних видів і таксономічною структурою платформи iNaturalist.

Проведено просторовий аналіз розподілу спостережень у межах адміністративних районів і територіальних громад Черкаської області з використанням ГІС-інструментів. Виявлено виражену нерівномірність просторового розподілу даних та домінування обмеженої кількості добре впізнаних таксонів, що є характерною рисою даних громадянської науки й зумовлено ефектом «упередженості спостерігача» (observer bias). Водночас показано, що зібрані дані дозволяють ідентифікувати осередки концентрації інвазійних видів, уточнити їх регіональне поширення та доповнити наявні відомості про інвазійну флору і фауну області.

Зроблено висновок, що громадянська наука є ефективним комплементарним інструментом регіонального моніторингу інвазійних видів, який поєднує наукові, освітні та практичні функції. Обґрунтовано доцільність інтеграції даних citizen science з результатами фахових польових обстежень і можливість масштабування запропонованого підходу на інші регіони України. **Ключові слова:** citizen science; інвазійні види; біологічні інвазії; регіональний моніторинг; iNaturalist; просторовий аналіз; біорізноманіття; Черкаська область.

Citizen science as a tool for monitoring invasive species (a case study of the Cherkasy region). Lavrinenko K., Spriahailo O.A., Spriahailo O.V., Havryliuk M., Iliukha O., Shevchuk V.

The paper presents the potential of citizen science as a tool for regional monitoring of invasive alien species under conditions of limited resources of traditional biological survey methods. The relevance of using citizen science data for analysing the spread of invasive species in Ukraine is substantiated in the context of fragmented available information and the absence of a comprehensive national monitoring system.

The study analyses the results of the regional project «Invasive Species of the Cherkasy Region» implemented on the iNaturalist platform in 2025. The dataset includes 3,885 observations recorded by 158 participants and covers 56 taxa of invasive plant and animal species. Taxonomic unification of species names was carried out to account for discrepancies between the official regional list of invasive species and the taxonomic framework used by iNaturalist.

A spatial analysis of observation distribution within administrative districts and territorial communities of the Cherkasy region was conducted using GIS tools. The results reveal a pronounced spatial unevenness of data and the dominance of a limited number of easily recognisable taxa, which is characteristic of citizen science datasets and largely обусловлено the observer bias effect. At the same time, the collected data made it possible to identify invasion hotspots, уточнити regional distribution patterns, and supplement existing knowledge on invasive flora and fauna of the region.

It is concluded that citizen science represents an effective complementary instrument for regional monitoring of invasive species, combining scientific, educational, and practical functions. The study substantiates the feasibility of integrating citizen science data with professional field surveys and highlights the potential for scaling the proposed approach to other regions of Ukraine. **Key words:** citizen science; invasive alien species; biological invasions; regional monitoring; iNaturalist; spatial analysis; biodiversity; Cherkasy region.

Постановка проблеми. Посилення процесів глобалізації та кліматичні зміни, що супроводжуються зростанням частоти екстремальних погодних явищ, підвищують вразливість екосистем до вторгнення та поширення чужорідних видів. Біологічні інвазії не

лише негативно впливають на аборигенне біорізноманіття та екосистемні послуги, а й становлять суттєву загрозу для економіки та суспільного добробуту [1-3].

Попри зростання наукового інтересу до інвазійних видів, ця проблема у світі досі отримує менше



суспільної, політичної та законодавчої уваги порівняно з іншими ключовими загрозами біорізноманіттю та суспільству, наприклад, кліматичними змінами [4]. За таких умов масштабний моніторинг та контроль інвазійних видів рослин і тварин є особливо нагальними [5], оскільки ефективне управління ними потребує своєчасного виявлення, постійного спостереження та використання актуалізованих просторових даних про їхнє поширення [6].

Водночас, традиційні методи моніторингу інвазійних видів часто є ресурсомісткими та не забезпечують достатнього просторового й часового охоплення, особливо за обмежених фінансових та кадрових ресурсів, що ускладнює прийняття науково обґрунтованих управлінських рішень. У зв'язку з цим актуальним залишається пошук альтернативних або комплементарних підходів до збору та аналізу даних про поширення інвазійних видів [6, 7].

Актуальність дослідження. В Україні проблема інвазійних видів ускладнюється фрагментарністю наявних даних, нерівномірністю досліджень між регіонами та обмеженою кількістю довготривалих програм спостережень. На регіональному рівні офіційні переліки інвазійних видів рослин затверджено лише у двох областях – Закарпатській (2017 р.) [8] та Черкаській (2021 р.) [9]. Загальнодержавна інвентаризація інвазійних видів, системи їх моніторингу та оцінки ризиків і втрат, а також скоординовані заходи протидії біологічним інвазіям в Україні відсутні [10]. Це не лише знижує ефективність оцінки динаміки інвазій, а й ускладнює розробку науково обґрунтованих заходів реагування.

У цьому контексті одним із перспективних рішень для збору й опрацювання великого обсягу даних, є залучення громадянської науки (citizen science) [11], що дозволяє частково компенсувати дефіцит традиційних польових досліджень і забезпечити безперервний моніторинг біологічних інвазій.

Черкаська область характеризується значною ландшафтною різноманітністю, поєднанням природних і антропогенно трансформованих екосистем, розвиненою річковою мережею, значними площами сільськогосподарських угідь, щільною транспортною інфраструктурою та великими урбанізованими територіями. Сукупність цих чинників створює сприятливі умови для проникнення й поширення інвазійних видів. Водночас наявні відомості про сучасний стан і просторове поширення інвазійних видів у межах Черкаської області [12-20] мають фрагментарний характер і залишаються неповними. Це зумовлює необхідність використання альтернативних джерел інформації та оцінки їхнього наукового потенціалу.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження виконане в контексті сучасних наукових і практичних завдань, пов'язаних із моніторингом та контролем інвазійних чужорідних видів, що

є одним із пріоритетних напрямів збереження біорізноманіття на національному та міжнародному рівнях. Робота відповідає положенням національної екологічної політики України у сфері запобігання біологічним інвазіям, а також узгоджується з підходами, закладеними в документах Європейського Союзу щодо управління інвазійними видами.

Наукове значення роботи пов'язане з розвитком регіональних досліджень біологічних інвазій та інтеграцією інструментів громадянської науки у практику моніторингу біорізноманіття. Практичний аспект полягає у формуванні актуалізованої бази спостережень інвазійних видів у межах Черкаської області, що може слугувати інформаційною основою для подальшого моніторингу, планування природоохоронних заходів та підготовки освітніх і наукових ініціатив.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних дослідженнях дедалі більшої уваги набуває використання громадянської науки як інструменту збору даних, зокрема у сфері моніторингу біорізноманіття та інвазійних видів. Громадянську науку розглядають як залучення широкої громадськості до науково-дослідної діяльності, в межах якої громадяни активно сприяють реалізації наукових проєктів шляхом використання власних знань, інтелектуальних зусиль, інструментів або ресурсів [21].

Громадянська наука має значний потенціал у вирішенні глобальних екологічних, соціальних та освітніх проблем, зокрема у сфері моніторингу біорізноманіття [7, 22]. Залучення широкого кола учасників дозволяє суттєво розширити просторове та часове охоплення спостережень, що є особливо важливим для виявлення й аналізу біологічних інвазій.

Останніми роками активно розвивається напрям громадянської науки, що передбачає використання цифрових платформ і онлайн-ресурсів, таких як iNaturalist, eBird, MammalWeb, PublicLab, Spipoll та ін. [11]. Вони поєднують масовість збору даних із механізмами експертної верифікації. Це відкриває нові можливості для досліджень біорізноманіття та підвищує якість даних, отриманих у межах громадських наукових ініціатив. Інтеграція даних громадянської науки до глобальних баз даних, зокрема GBIF, підвищує їх наукову цінність і створює передумови для використання таких даних у регіональних і глобальних дослідженнях.

Окрему увагу в сучасних дослідженнях приділено використанню мобільних додатків для збору даних про інвазійні види. За даними Howard et al. (2022) [23] їх широке впровадження здатне суттєво збільшити просторово-часове охоплення спостережень, створити нові можливості для моделювання динаміки вторгнень і підвищити ефективність управлінських рішень. Автори також зазначають, що своєчасне виявлення інвазійних видів може забезпечити значні економічні вигоди, зменшуючи втрати для сільського господарства та природних екосистем.

Водночас громадянська наука виконує важливу освітню та просвітницьку функції, сприяючи підвищенню екологічної грамотності та формуванню відповідального ставлення громадян до збереження біорізноманіття. Участь у таких проєктах дозволяє залученим особам переходити від ролі пасивних спостерігачів до активних учасників процесів дослідження й охорони довкілля [7].

У вітчизняних наукових публікаціях проблематика громадянської науки наразі висвітлена обмежено. Переважна більшість робіт присвячена аналізу загальних підходів [11, 24], зарубіжного досвіду та потенціалу впровадження citizen science в освітньому середовищі [25-28], тоді як повідомлення про дослідження, що ґрунтуються на аналізі результатів конкретних проєктів і практичного використання отриманих даних, одиничні [29].

Невирішена раніше частина загальної проблеми. Попри зростання кількості вітчизняних досліджень інвазійних видів, більшість з них зосереджена переважно на їх видовому складі або екологічних наслідках інвазій. Питання використання даних громадянської науки для систематичного моніторингу інвазійних видів в Україні залишаються недостатньо опрацьованими. Застосування платформ citizen science, зокрема iNaturalist, поки що має фрагментарний характер і рідко супроводжується комплексним аналізом просторового розподілу видів, якості і верифікації спостережень та оцінкою можливостей практичного використання отриманих даних.

Таким чином, питання ефективності використання даних громадянської науки для систематичного аналізу інвазійних видів, зокрема і на рівні окремих регіонів України, залишається недостатньо дослідженим. Це зумовлює необхідність оцінки потенціалу таких підходів на конкретних територіях, зокрема в умовах антропогенно трансформованих ландшафтів Черкаської області.

Новизна. Наукова новизна дослідження полягає в комплексній оцінці потенціалу даних громадянської науки для аналізу поширення інвазійних чужорідних видів на регіональному рівні на прикладі Черкаської області. Уперше здійснено систематичну інтеграцію регіонального переліку інвазійних видів із даними платформи iNaturalist із урахуванням таксономічних розбіжностей, синонімії та відмінностей у таксономічних рангах. Проведено просторовий аналіз розподілу спостережень у межах територіальних громад області та визначено чинники, що впливають на структуру отриманих даних, зокрема просторову упередженість спостерігачів (observer bias). Дослідження також демонструє освітній і науково-практичний потенціал інтеграції citizen science у регіональні моніторингові ініціативи щодо біологічних інвазій.

Методологічне та загальнонаукове значення. Методологічне значення дослідження полягає в апробації підходу до використання даних плат-

форми iNaturalist для регіонального аналізу поширення інвазійних чужорідних видів із урахуванням специфіки таксономічних розбіжностей між офіційними переліками та глобальними онлайн-базами даних. У роботі відпрацьовано процедуру таксономічної уніфікації назв, визначення рівня агрегування таксонів та інтерпретації спостережень різного ступеня достовірності. Запропонований алгоритм опрацювання даних громадянської науки в поєднанні із просторовим аналізом у ГІС-середовищі може розглядатися як модель дослідницького дизайну для подібних регіональних досліджень.

Загальнонаукове значення роботи полягає у розширенні емпіричної бази досліджень біологічних інвазій за рахунок інтеграції даних громадянської науки у регіональний екологічний аналіз. Отримані результати уточнюють сучасні уявлення про просторову структуру поширення інвазійних чужорідних видів у центральній частині України та демонструють потенціал поєднання традиційних підходів моніторингу з відкритими цифровими платформами. Дослідження також поглиблює розуміння впливу соціальних чинників (зокрема освітньої активності та observer bias) на формування масивів екологічних даних у межах citizen science.

Матеріали і методи. В основу статті покладено результати дослідження «Залучення громадськості як інструмент протидії поширенню інвазійних видів», що проводилося у 2025 році науковцями ГО «Екосоціум» та Черкаського національного університету імені Богдана Хмельницького у рамках проєкту «Разом за екологічну демократію, справедливість та верховенство права в Україні» (TEDJusticeROL) за фінансової підтримки Міжнародної благодійної організації «ЕКОЛОГІЯ – ПРАВО – ЛЮДИНА» та Уряду США.

Реалізація проєкту включала зокрема, створення регіонального проєкту «Інвазійні види Черкаської області» на платформі iNaturalist; залучення учасників через освітні та інформаційні заходи; підготовку і поширення просвітницьких і наукових матеріалів.

Збір даних на платформі iNaturalist здійснювався з 1 квітня 2025 року, аналіз зібраних матеріалів проведено у січні 2026 року. До проєкту автоматично включалися всі спостереження інвазійних видів, зафіксовані в межах Черкаської області, незалежно від формальної участі користувачів у проєкті [30].

Станом на 30 січня 2026 року в межах проєкту було зареєстровано 158 спостерігачів і 3885 спостережень, що охоплюють 56 таксонів інвазійних видів. Водночас перелік інвазійних видів, включений до створеного на платформі iNaturalist регіонального проєкту, налічував 62 таксони, зокрема 48 видів рослин і 14 видів тварин. Таким чином, шість таксонів, включених до переліку, упродовж періоду дослідження не були зафіксовані учасниками проєкту.

Таксони представлені на різних таксономічних рівнях (вид, підвид, видовий агрегат, рід), що зумов-

лено особливостями чинного регіонального переліку інвазійних видів рослин Черкаської області [31] та таксономічною структурою платформи iNaturalist.

Окрім видів, включених до офіційного регіонального переліку інвазійних рослин, до проєкту було додано низку таксонів, які наразі не мають офіційного статусу інвазійних у Черкаській області, проте характеризуються активним насіннєвим або вегетативним розмноженням та проявляють інвазійні властивості в інших регіонах України. Окрему увагу при формуванні цієї групи було приділено так званім «харизматичним» декоративним видам, які активно культивуються людиною і водночас демонструють високий інвазійний потенціал.

Під час аналізу даних було враховано розбіжності між таксономічними підходами регіонального переліку інвазійних видів рослин і платформи iNaturalist, а для забезпечення порівнюваності результатів застосовано таксономічну уніфікацію назв відповідно до підходів, прийнятих у iNaturalist.

Зокрема, низка таксонів у регіональному переліку представлена під таксономічно синонімічними назвами (*Fraxinus pennsylvanica* як *Fraxinus lanceolata*, *Erigeron canadensis* як *Conyza canadensis*, *Erigeron annuum* як *Phalacroloma annuum*, *Euphrosyne xanthiifolia* як *Iva xanthiifolia*). Аналогічний підхід застосовується до *Cannabis ruderalis*, який у системі iNaturalist не виокремлюється як самостійний таксон і враховується в межах *Cannabis sativa* s.l.

Рід *Cuscuta* як у регіональному переліку інвазійних видів, так і в межах проєкту iNaturalist був розглянутий на рівні роду. Такий підхід зумовлений складністю надійної видової ідентифікації представників роду за фотоспостереженнями, а також значною таксономічною близькістю окремих видів, що ускладнює їх коректне розмежування в межах громадянської науки.

Окрему групу становили випадки розбіжностей у таксономічному ранзі. Так, наведений у регіональному переліку *Xanthium albinum*, у системі iNaturalist розглядається в межах *Xanthium orientale* ssp. *riparium*. У таких ситуаціях спостереження враховувалися на тому таксономічному рівні, який підтримується платформою, з відповідною приміткою про таксономічну інтерпретацію.

У регіональному переліку інвазійних видів *Parthenocissus* представлений у вигляді видового агрегату (*P. quinquefolia* aggr., що включає *P. quinquefolia* та *P. inserta*). Водночас у проєкті iNaturalist ці таксони розділено на два окремі види відповідно до сучасної таксономічної концепції.

Водночас для деяких таксонів застосовано зворотний підхід. Зокрема, *Phalacroloma annuum* та *Solidago canadensis* у регіональному переліку представлені як видові агрегати (*Phalacroloma annuum* aggr., *Solidago canadensis* aggr.), що включають кілька близьких видів. У межах проєкту iNaturalist ці групи враховані на рівні одного виду, що пов'я-

зано з практичними труднощами розрізнення окремих компонентів агрегатів за фотоматеріалами. Цей аспект розглядається як методологічне обмеження дослідження.

Слід також зазначити, що до регіонального переліку інвазійних видів включено лише *Reynoutria japonica*, тоді як в Україні інвазійними є також *R. sachalinensis* та гібрид *R. × bohemica*. У межах дослідження ці таксони не диференціювалися, що обмежує повноту оцінки поширення цього інвазійного комплексу.

У всіх зазначених випадках для аналізу використовувалися таксони, прийняті на платформі iNaturalist, із фіксацією їх відповідності до офіційного регіонального переліку інвазійних видів.

Перелік інвазійних видів тварин було сформовано на основі узагальнення сучасних наукових публікацій щодо чужорідної фауни України, фахових оглядів інвазійних видів, а також даних про їх фактичне поширення в центральній частині країни. Основними джерелами інформації були узагальнюючі видання, наукові повідомлення про знахідки чужорідних видів тварин в Україні та відомості про сучасний стан популяцій окремих інвазійних таксонів у природних і антропогенних екосистемах.

У результаті до проєкту було включено 14 інвазійних видів тварин, які належать до кількох великих систематичних груп і характеризуються різними механізмами інтродукції. Значну частину становлять інвазійні комахи, пов'язані з рослинними угрупованнями та деревними насадженнями. До них належать як фітофаги (ведмедиця біла американська *Hyphantria cunea* Dru Drury, 1773, міль мінуюча каштанова *Cameraria ohridella* Deschka & Dimic, 1986, вогнівка самшитова *Cydalima perspectalis* (Walker, 1859), жук кукурудзяний західний *Diabrotica virgifera* LeConte, 1868, златка вузькотіла смарагдова *Agrilus planipennis* (Fairmaire, 1888)), так і хижі види, інтродуковані як агенти біологічного контролю, зокрема гармонія азійська (*Harmonia axyridis* (Pallas, 1773)).

Окрему групу становлять інвазійні види хребетних, інтродуковані людиною свідомо або випадково. Серед них представлені риби, зокрема чебачок амурський (*Pseudorasbora parva* Temminck & Schlegel, 1846), царьок (*Lepomis gibbosus* (Linnaeus, 1758)) та ротань-головешка (*Perccottus glenii* Dybowski, 1877), що потрапили у водойми переважно внаслідок рибогосподарської діяльності або випадкового занесення разом із рибопосадковим матеріалом. До цієї ж групи належить і черепаха червоновуха (*Trachemys scripta* Thunberg, 1831), поширення якої пов'язане насамперед із випуском у природне середовище декоративних тварин із приватних колекцій.

Іншу категорію становлять ссавці, інтродуковані з господарською або мисливською метою. До них належать ондатра (*Ondatra zibethicus* (Linnaeus, 1766)), собака єнотоподібний (*Nyctereutes*

procyonoides (Gray, 1834)) та норка американська (*Neogale vison* (Schreber, 1777)), популяції яких сформувалися внаслідок акліматизації або втеч із звірогосподарств і згодом поширилися в природних екосистемах України. Включення цих видів до переліку зумовлене їх доведеним впливом на структуру місцевих біоценозів, зокрема через конкуренцію з аборигенними видами, хижацтво та трансформацію середовища існування.

Серед безхребетних видів особливої уваги заслуговує слимак іспанський (*Arion vulgaris* Mabille, 1868), поширення якого в Європі та Україні пов'язане насамперед із переміщенням ґрунту, садового матеріалу та декоративних рослин. Цей вид характеризується високою екологічною пластичністю і здатністю швидко формувати численні популяції в антропогенних та напівприродних біотопах.

Сформований перелік охоплює основні інвазійні види тварин, для яких наявні підтверджені дані про поширення на території Черкаської області або в суміжних регіонах центральної України. Водночас низку чужорідних таксонів, відомих для України, до аналізу свідомо не включали. Зокрема, не враховували окремі інтродуковані види риб (наприклад, амур білий *Stenopharyngodon idella* (Valenciennes, 1844), товстолобики *Hypophthalmichthys* spp., карась сріблястий *Carassius gibelio* (Bloch, 1782)), оскільки вони широко використовуються у рибогосподарській практиці.

У межах цього дослідження також не ставилося за мету охопити всі інвазійні види комах, кількість нових вторгнень яких протягом останніх десятиліть швидко зростає. Тому для аналізу було обрано обмежену кількість модельних видів. Крім того, поза переліком залишилися окремі синантропні безхребетні, поширені переважно в урбанізованому середовищі або тепличних комплексах, для яких відсутні достовірні дані про формування стабільних популяцій у природних біотопах області. Не враховували й види, що досягли високого ступеня натуралізації (наприклад, жук колорадський *Leptinotarsa decemlineata* Say, 1824).

Такий підхід дозволив зосередити увагу на видах, що мають найбільше екологічне значення для природних і напівприродних екосистем регіону та можуть бути ефективно документовані за допомогою платформ громадянської науки.

Таксономічну номенклатуру зоологічних таксонів у межах дослідження приведено у відповідність до системи, прийнятої на платформі iNaturalist, що забезпечує узгодженість назв із глобальними базами даних біорізноманіття та коректну інтеграцію спостережень у міжнародні інформаційні системи. У випадках сучасних ревізій систематики використовували актуальні таксономічні інтерпретації, підтримувані платформою (наприклад, використання назви *Neogale vison* замість традиційної *Mustela vison*).

Важливою складовою методології проєкту було поєднання збору даних із освітніми та інформа-

ційними заходами. Проведення семінару «Інвазії під лупою» для вчителів біології та студентів природничих спеціальностей забезпечило первинну підготовку потенційних учасників проєкту до моніторингу інвазійних видів із використанням цифрових платформ громадянської науки. Учасники семінару в подальшому залучали учнів до збору даних у межах навчальних і позанавчальних активностей.

Під час інтерпретації результатів було враховано притаманну даним громадянської науки нерівномірність просторового розподілу спостережень і залежність їх кількості від активності окремих користувачів (observer bias). Статистична корекція цього ефекту в межах дослідження не здійснювалася, оскільки метою роботи був якісний аналіз просторових закономірностей поширення інвазійних видів, а не кількісна оцінка їх чисельності. Зазначений аспект розглядається як методологічне обмеження дослідження і має бути врахований під час інтерпретації отриманих результатів.

Результати дослідження та їх обговорення. Основні кількісні характеристики зібраного масиву даних наведено в табл. 1.

Упродовж періоду дослідження 158 спостерігачів зафіксували 3 885 спостережень інвазійних видів у межах усіх адміністративних районів Черкаської області. Найбільша щільність спостережень зосереджена у північно-східній частині області, що відповідає адміністративним мемам Черкаського району (рис. 1).

Загалом у межах проєкту було зафіксовано 56 із 62 таксонів, включених до аналізу, зокрема 46 видів рослин (82,1%) та 10 видів тварин (17,9%).

Абсолютна більшість спостережень припадає на рослини – 3 739 спостережень (96,2%), тоді як інвазійні види тварин представлені 146 спостереженнями (3,8%). Такий розподіл зумовлений як переважанням

Таблиця 1.
Загальна характеристика масиву даних,
зібраних у межах проєкту

Показник	Значення
Загальна кількість спостережень	3885
Кількість спостерігачів	158
Кількість ідентифікаторів	184
Кількість таксонів, включених до проєкту	62
Кількість зафіксованих таксонів	56
Кількість спостережень рослин	3739
Кількість спостережень тварин	146
Частка ботанічних спостережень, %	96,2
Частка зоологічних спостережень, %	3,8
Адміністративне охоплення	4 адміністративні райони

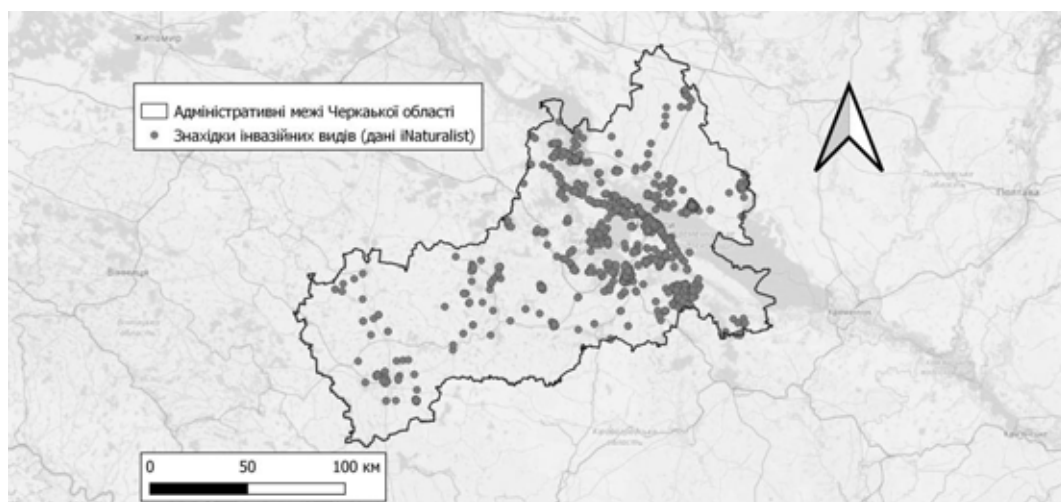


Рис. 1. Просторовий розподіл спостережень інвазійних видів на території Черкаської області за даними платформи iNaturalist (2025 р.).

ботанічних таксонів у сформованому переліку, так і більшою доступністю рослин для фотофіксації та ідентифікації.

Аналіз частоти реєстрацій виявив значну нерівномірність представленості інвазійних видів у зібраному масиві даних (рис. 2). Основну частку спостережень формує обмежена кількість видів, тоді як більшість таксонів представлена поодинокими або нечисленними реєстраціями. Така структура є типовою для даних, отриманих у межах проєктів громадянської науки, і відображає поєднання реаль-

ного поширення видів, їх екологічної домінантності, а також доступності для візуальної фіксації та коректної ідентифікації.

Розподіл кількості спостережень між інвазійними видами має виражено нерівномірний характер і відповідає типовій для даних громадянської науки структурі з домінуванням обмеженої кількості найбільш поширених і легко ідентифікованих таксонів. Абсолютним лідером за кількістю реєстрацій (696 спостережень) є амброзія полинолиста (*Ambrosia artemisiifolia* L.), що відображає як її зна-

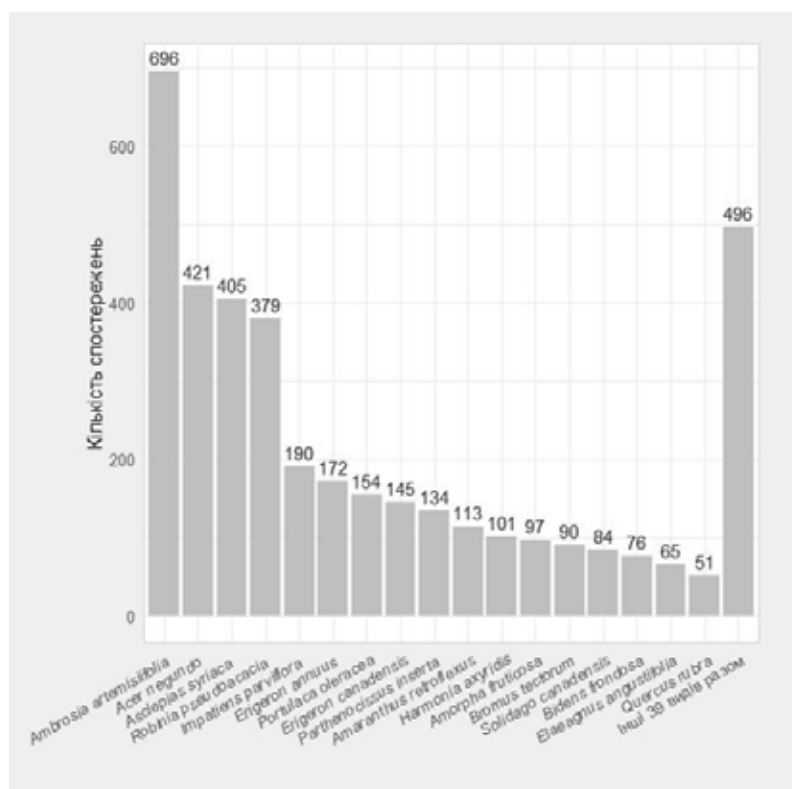


Рис. 2. Частота реєстрації інвазійних видів у зібраному масиві даних

чне поширення в регіоні, так і підвищену суспільну увагу до цього виду, зумовлену добре відомими алергенними властивостями та його сталою присутністю в публічному інформаційному просторі.

До групи видів рослин із високою частотою фіксацій також належать клен ясенелистий (*Acer negundo* L.) – 421 спостереження, ваточник сирійський (*Asclepias syriaca* L.) – 405 та робінія звичайна (*Robinia pseudoacacia* L.) – 379. Усі зазначені види є широко розповсюдженими компонентами антропогенних і напівприродних екосистем Черкаської області.

Значна кількість реєстрацій припадає також на інвазійні трав'янисті види відкритих і порушених місцезростань, зокрема розрив-траву дрібноквіткову (*Impatiens parviflora* DC), злинку однорічну (*Erigeron annuus* (L.) Pers.), портулак городній (*Portulaca oleracea* L.), злинку канадську (*Erigeron canadensis* L.) та щирицю загнуту (*Amaranthus retroflexus* L.). Такий розподіл свідчить про активне залучення спостерігачів до фіксації найдоступніших видів, характерних для узбіч, агроландшафтів, населених пунктів і рекреаційних територій.

Значна частина видів рослин, включених до проекту, представлена нечисленними або одиничними спостереженнями. Це стосується, зокрема, таксонів із локальним або мозаїчним поширенням та потенційною інвазійною активністю в області, таких як гірчак японський (*Reynoutria japonica* Houtt.), борщівник Сосновського (*Heracleum sosnowskyi* Manden.), розрив-трава залозиста (*Impatiens glandulifera* Royle), а також видів, складних для виявлення або коректної ідентифікації непрофесійними спостерігачами. Обмежена представленість таких таксонів у даних громадянської науки частково пояснюється феноменом «рослинної сліпоти», за якого люди схильні не помічати та не розрізняти більшість видів рослин у навколишньому середовищі [32]. Така структура зібраних даних підкреслює доцільність комплексного підходу до аналізу біологічних інвазій, що поєднує інструменти громадянської науки з цілеспрямованими польовими обстеженнями.

Як уже зазначалося, інвазійні види тварин представлені у вибірці значно меншою кількістю спостережень, навіть у випадку відносно добре впізнаваних таксонів, зокрема гармонії азійської (*Harmonia axyridis*) – 101 спостереження. Більшість інших зоологічних видів (*Trachemys scripta*, *Ondatra zibethicus*, *Nyctereutes procyonoides*, *Lepomis gibbosus* тощо) зафіксовано поодинокими спостереженнями, що відображає як реальну низьку чисельність або локальний характер їх популяцій, так і обмежену доступність таких об'єктів для фотофіксації в межах проєктів громадянської науки.

Серед таксонів, включених до переліку інвазійних видів проєкту, шість видів не були зафіксовані учасниками протягом усього періоду дослідження, ще декілька представлені поодинокими спостере-

женнями. Відсутність або низька кількість реєстрацій окремих інвазійних видів не свідчить про їх повну відсутність у регіоні, а, ймовірно, зумовлена поєднанням біогеографічних, екологічних, методичних і суспільних чинників. До них належать нерівномірність поширення видів, низька чисельність локальних популяцій, складність візуального виявлення або коректної ідентифікації неспеціалістами, а також обмеження фотодокументування в межах підходів громадянської науки.

Частина таксонів, включених до проєкту, характеризується переважно північним, західним або приморським поширенням у межах України та є малопоширеною на території Черкаської області. До цієї групи належать, зокрема, люпин багатолістий (*Lupinus polyphyllus* Lindl.), рудбекія волосиста (*Rudbeckia hirta* L.), слимак іспанський (*Arion vulgaris*) та ценхрус довгоголковий (*Cenchrus longispinus* (Hack.) Fernald), для яких у регіоні відомі лише поодинокі знахідки в попередні роки. Водночас з огляду на сучасні кліматичні зміни та зростання антропогенного впливу не можна виключати подальшого розширення ареалів кожного з цих видів, що підкреслює важливість їх включення до регіональних програм моніторингу й необхідність поєднання даних громадянської науки з цілеспрямованими польовими обстеженнями.

Окрему групу становлять види, реєстрація яких у межах платформ громадянської науки є ускладненою через особливості їх біології або виявлення. Так, златка ясенева смарагдова вузькотіла (*Agrylus planipennis*) рідко фіксується у спостереженнях через короткий період активності імаго та складність його розпізнавання за непрямими ознаками ураження дерев. Подібні обмеження характерні також для хижих і водних видів тварин, зокрема норка американська (*Neogale vison*) та ротань-головешка (*Perccottus glenii*), які ведуть прихований спосіб життя й рідко стають об'єктами якісної фотофіксації.

Таким чином, відсутність спостережень або одиничні реєстрації окремих інвазійних видів у межах проєкту відображає не лише реальні особливості їх поширення в регіоні, а й методичні обмеження підходів громадянської науки. Це підкреслює доцільність поєднання таких даних із результатами цілеспрямованих польових обстежень і фахових моніторингових програм.

Аналіз кількості спостережень для таксонів, доданих до проєкту поза межами офіційного регіонального переліку інвазійних видів, засвідчив різний ступінь реалізації їх інвазійного потенціалу на території Черкаської області. Зокрема, для мірабіліса нічноцвітного (*Mirabilis nyctaginea* (Michx.) MacMill.) – 21 спостереження та хрінниці крупковидної (*Lepidium draba* L.) – 18 спостережень, зафіксовано рівень представленості, співставний із рядом офіційно визнаних інвазійних таксонів із невисокою частотою реєстрацій. Це свідчить про наявність локальних

осередків поширення та підтверджує доцільність включення цих видів до переліків для подальшого моніторингу. Водночас канатник Теофраста (*Abutilon theophrasti* Medik.) – 9 спостережень та борщівник Сосновського (*Heracleum sosnowskyi*) – 5 спостережень, представлені нечисленними реєстраціями, що узгоджується з наявними даними щодо їх фрагментарного поширення в центральній частині України.

Серед декоративних видів із високим інвазійним потенціалом виявлено виражену неоднорідність за кількістю спостережень. Сумах коротковолосий, або оцтове дерево (*Rhus typhina* L.) – 17 спостережень, та карагана дерев'яниста, або жовта акація (*Caragana arborescens* Lam.) – 13, характеризуються відносно високою частотою реєстрацій порівняно з іншими таксонами цієї групи. Натомість рудбекія кінчаста (*Rudbeckia laciniata* L.) – 2 спостереження, шипшина зморшкувата (*Rosa rugosa* Thunb.) – 2, павловнія повстиста (*Paulownia tomentosa* (Thunb.) Steud.) – 1 та люпин багатолістий (*Lupinus polyphyllus*) – 1, представлені лише одиничними реєстраціями.

Загалом отримані результати свідчать, що більшість декоративних таксонів, включених до проєкту, наразі не проявляють ознак масштабної інвазії в межах області. Водночас їх фіксація в напівприродних та антропогенно трансформованих біотопах підкреслює доцільність подальшого спостереження з метою превентивного моніторингу біологічних інвазій.

Розподіл спостережень інвазійних видів між територіальними громадами Черкаської області має виражено нерівномірний характер (рис. 3). Із 66 тери-

торіальних громад у значній частині зафіксовано не більше п'яти спостережень або вони відсутні повністю, тоді як кілька громад формують чітко окреслені осередки концентрації даних. Найвищі показники загальної кількості спостережень зареєстровано в Іркліївській (936), Черкаській (541), Смілянській (463), Медведівській (305), Канівській (194) та Будищенській (180) територіальних громадах.

Водночас отримані результати відображають не стільки реальну інтенсивність поширення інвазійних видів, скільки просторові відмінності в активності спостерігачів, доступності територій та наявності локальних освітніх або наукових ініціатив. Такий ефект відповідає явищу *observer bias*, характерному для даних громадянської науки, коли щільність реєстрацій значною мірою залежить від рівня залученості учасників та інтенсивності обстеження територій.

Так, у Черкаській, Смілянській, Будищенській та Медведівській територіальних громадах упродовж реалізації проєкту було проведено найбільшу кількість польових виїздів зі студентами в межах навчальних практик, біобліців і виїзних освітніх заходів, що зумовило підвищену щільність реєстрацій інвазійних видів у межах цих територій.

Висока інтенсивність спостережень у Канівській та Медведівській територіальних громадах пов'язана з розташуванням у їхніх межах великих і активно функціонуючих об'єктів природно-заповідного фонду – Канівського природного заповідника та Національного природного парку «Холодний Яр». Ці території характеризуються регулярною присут-

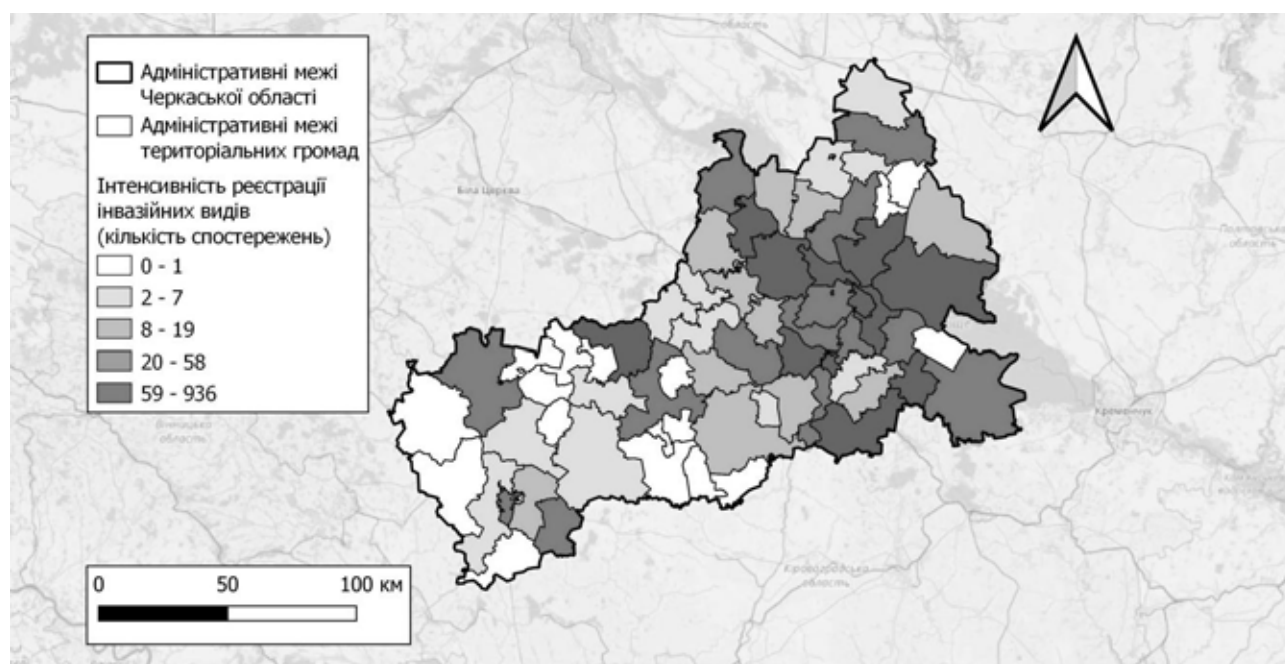


Рис. 3. Інтенсивність реєстрації інвазійних видів у територіальних громадах Черкаської області (за даними iNaturalist, 2025 р.).

ністю фахівців, студентів і представників природоохоронних організацій, що створює сприятливі умови для систематичного виявлення та документування інвазійних видів.

Показовим прикладом впливу активності окремих учасників на просторову структуру даних є Іркліївська територіальна громада, де надзвичайно висока кількість спостережень була зумовлена цілеспрямованою і тривалою роботою одного мотивованого учасника – учня, який виконував дослідницьку роботу в межах Малої академії наук. Цей випадок наочно демонструє значний потенціал підходів громадянської науки навіть за участі обмеженої кількості спостерігачів та підкреслює роль індивідуальної ініціативи у формуванні просторового розподілу даних.

Аналіз часової динаміки надходження спостережень засвідчив, що найбільш інтенсивне зростання активності користувачів припадало на періоди після проведення освітніх заходів і польових активностей. Вагому роль у цьому процесі відіграли шкільні колективи та освітні осередки, які інтегрували тематику інвазійних видів у навчальний процес. Зокрема, після проведення освітнього семінару «Інвазії під лупою» було зафіксовано зростання активності користувачів платформи iNaturalist у межах Черкаської області. Матеріали семінару використовувалися залученими вчителями біології у практичній роботі з учнями. Паралельно до збору даних активно залучалися студенти закладів вищої освіти, для яких фіксація інвазійних видів була інтегрована в програму польових практик, а також забезпечувалася участю у Школі біорізноманіття в НПП «Холодний Яр», Школі молодого природоохоронця та Першому загальноукраїнському біобліці. У результаті кілька курсових і дипломних робіт, а також одна магістерська робота були присвячені проблематиці інвазійних видів, що свідчить про формування сталого науково-освітнього інтересу до цієї тематики.

Головні висновки. Проведене дослідження продемонструвало можливості використання даних громадянської науки для аналізу поширення інвазійних чужорідних видів. На прикладі Черкаської області

показано, що такі дані дозволяють виявляти просторові закономірності поширення інвазійних видів, визначати осередки їх концентрації та доповнювати наявні відомості про регіональну інвазійну флору і фауну.

Отримані результати засвідчують, що громадянська наука є ефективним джерелом інформації для первинного виявлення інвазійних видів та аналізу їх поширення. Водночас нерівномірність розподілу спостережень, зумовлена активністю окремих учасників і локальними освітніми ініціативами, обмежує можливість прямої кількісної інтерпретації інтенсивності інвазій без додаткових коригувальних підходів. Для вивчення видів, які через особливості способу життя складно виявляти візуально та фотографувати, необхідне поєднання даних громадянської науки з цілеспрямованими науковими дослідженнями.

Загалом дослідження підтверджує доцільність інтеграції даних громадянської науки в систему регіонального моніторингу інвазійних видів як комплементарного інструменту, що розширює просторове охоплення спостережень і сприяє залученню наукових та освітніх спільнот до вирішення проблеми біологічних інвазій.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати дослідження створюють підґрунтя для масштабування підходів громадянської науки у системі моніторингу інвазійних видів на рівні інших регіонів України. Запропонований формат аналізу може бути використаний для порівняльних міжрегіональних досліджень з метою виявлення загальних закономірностей та регіональних особливостей поширення інвазійних таксонів.

Перспективним напрямом є інтеграція даних громадянської науки з результатами фахових польових обстежень і відомчого екологічного моніторингу, що дозволить підвищити точність оцінок і розширити можливості прогнозування динаміки інвазій. Подальший розвиток таких підходів може сприяти формуванню єдиної національної системи збору та аналізу інформації про інвазійні види з використанням цифрових платформ і регіональних ініціатив.

Література

1. IPBES. Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Bonn, Germany: IPBES secretariat, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3831673>.
2. Kaushik P., Pati P. K., Khan M. L., Khare P. K. Plant functional traits best explain invasive species' performance within a dynamic ecosystem: a review. *Trees, Forests and People*. 2022. Vol. 8. Article 100260. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100260>
3. Paine D. R., Sheppard A. W., Cook D. C. et al. Global threat to agriculture from invasive species. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2016. Vol. 113. P. 7575-7579. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1602205113>
4. Kourantidou M., Haubrock P. J., Cuthbert R. N., Bodey T. W., Lenzner B., Gozlan R. E., Nunez M. A., Salles J.-M., Diagne C., Courchamp F. Invasive alien species as simultaneous benefits and burdens: trends, stakeholder perceptions and management. *Biological Invasions*. 2022. Vol. 24(7). P. 1905-1926. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10530-021-02727-w>
5. Holden C.A., Bailey J.P., Taylor J.E., Martin F., Beckett P., McAinsh M. Know your enemy: Application of ATR-FTIR spectroscopy to invasive species control. *PLoS ONE*. 2022. Vol. 17, № 1. Article e0261742. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0261742>.
6. Вишенська І. Г., Лисенко Д. О. Моніторинг інвазійних деревних видів рослин в урбоекосистемах міста Києва. *Наукові записки НаУКМА. Біологія і екологія*. № 8. 2025. С. 62-69. DOI: <https://doi.org/10.18523/2617-4529.2025.8.62-69>
7. Marchante E., López-Núñez F. A., Duarte L. N., Marchante H. The role of citizen science in biodiversity monitoring: when invasive species and insects meet. In: *Biological invasions and global insect decline*. Academic Press, 2024. P. 291-314. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99918-2.00011-2>

8. Шевера М. В., Протопопова В. В., Томенчук Д. Є., Андрик Є. Й., Кіш Р. Я. Перший в Україні офіційний регіональний список інвазійних видів рослин Закарпаття. *Вісник Національної академії наук України*. 2017. № 10. С. 53-61.
9. Куземко А. А., Спрягайло О. А., Спрягайло О. В., Шевчик В. Л., Чорна Г. А. Офіційні переліки інвазійних видів рослин як передумова контролю фітоінвазій. *VinSmartEco: збірник матеріалів III Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Вінниця, 18-20 трав. 2023 р.)*. Вінниця, 2023. С. 97-99.
10. Знахідки чужорідних видів рослин та тварин в Україні. Серія: «Conservation Biology in Ukraine». Вип. 29. Київ; Чернівці : Друк Арт, 2023. С. 7.
11. Скуйбіда О. Л. Громадянська наука в сфері екології та захисту навколишнього середовища: світові тенденції та перспективи для України. *Екологічні науки*. № 5(50). 2023. С. 204-208. DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.5-50.30>.
12. Бондаренко Г. М., Сіранський В. Ю. Про деякі знахідки адвентивних видів рослин з території України. *Знахідки чужорідних видів рослин та тварин в Україні*. Серія: «Conservation Biology in Ukraine». Вип. 29. Чернівці: Друк Арт, 2023. С. 60-77.
13. Гаврилук М.Н. Знахідки деяких інвазійних видів комах у центральній Україні. *Знахідки чужорідних видів рослин та тварин в Україні*. Серія: «Conservation Biology in Ukraine». Вип. 29. Чернівці: Друк Арт, 2023. С. 89-90.
14. Конякін С. М., Буджак В. В. Нові відомості про знахідки чужорідних видів рослин в прибережно-водних екотопах України. *Знахідки чужорідних видів рослин та тварин в Україні*. Серія: «Conservation Biology in Ukraine». Вип. 29. Чернівці: Друк Арт, 2023. С. 151-164.
15. Конякін С. М., Лещенюк О. М. Знахідки інвазійних чужорідних видів рослин в м. Сміла (Черкаська область). *Знахідки чужорідних видів рослин та тварин в Україні*. Серія: «Conservation Biology in Ukraine». Вип. 29. Чернівці: Друк Арт, 2023. С. 178-200.
16. Куземко А. А. Локалітети інвазійних чужорідних видів судинних рослин за даними Ukrainian Grassland Database. *Знахідки чужорідних видів рослин та тварин в Україні*. Серія: «Conservation Biology in Ukraine». Вип. 29. Чернівці: Друк Арт, 2023. С. 215-233.
17. Куземко А. А., Спрягайло О. А., Спрягайло О. В., Шевчик В. Л. Інвазійні види рослин в об'єктах природно-заповідного фонду місцевого значення Черкаського району Черкаської області. *Знахідки чужорідних видів рослин та тварин в Україні*. Серія: «Conservation Biology in Ukraine». Вип. 29. Чернівці: Друк Арт, 2023. С. 234-237.
18. Мамчур Т. В., Любич В. В., Чорна Г. А. Знахідки інвазійних видів рослин. *Знахідки чужорідних видів рослин та тварин в Україні*. Серія: «Conservation Biology in Ukraine». 2023. Вип. 29. Чернівці: Друк Арт, 2023. С. 268.
19. Назаренко В. Ю. Деякі знахідки чужорідних комах і рослин в Україні. *Знахідки чужорідних видів рослин та тварин в Україні*. Серія: «Conservation Biology in Ukraine». Вип. 29. Чернівці: Друк Арт, 2023. С. 308-310.
20. Шиндер О. І., Коструба Т. М., Чорна Г. А., Коломійчук В. П. Нові і доповнюючі відомості про флору Середнього Придніпров'я. *Наукові записки НаУКМА. Біологія і екологія*. 2022. Том 5. С. 65-75.
21. Silva C. Societize participatory experiments, dissemination and networking activities in perspective. *Human Computation*. 2014. Vol. 1, No. 2. DOI: <https://doi.org/10.15346/hc.v1i2.4>
22. Скуйбіда О. Л. Громадянська наука у вищій освіті: міжнародний досвід для сприяння сталому розвитку. *Природнична освіта та наука*. Вип. 6. 2024. С. 46-51. DOI <https://doi.org/10.32782/NSER/2024-6.06>.
23. Howard L., Van Rees C.B., Dahlquist Z., Luikart G., Hand B.K. A review of invasive species reporting apps for citizen science and opportunities for innovation. *NeoBiota*. 2022. Vol. 71. P. 165-188. DOI <https://doi.org/10.3897/neobiota.71.79597>
24. Скуйбіда О. Л. Регулювання громадянської науки в Україні: від теорії до практики. *Академічні студії. Серія «Педагогіка»*. Вип. 2. 2024. С. 128-136.
25. Горохова Т. Громадянська наука та її роль у сталому розвитку України. Відкрита наука та інновації в Україні 2022: збірник матеріалів I Міжнародної конференції, м. Київ, 27-28 жовтня 2022 р. Київ, 2022. С. 94-96. DOI: <https://doi.org/10.35668/978-966-479-129-5>.
26. Дух О. Використання громадянської науки у формуванні екологічної компетентності студентської молоді. Бессерівські природознавчі студії: збірник матеріалів II Міжнародної наукової конференції, м. Кременець, 24-25 вересня 2024 р. Кременець, 2024. С. 207-208. URL: https://kognia.edu.ua/images/main_dir/kaf_bio/nauka/bess.pdf#page=207
27. Коломієць А., Коломієць Д. Можливості та результати залучення майбутніх педагогів до громадянської науки. *Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики навчання в підготовці фахівців: методологія, теорія, досвід, проблеми*. Вип. 55. 2020. С. 166-177. DOI: <https://doi.org/10.31652/2412-1142-2020-55-166-177>
28. Серебряков В. В. Громадянська наука в школі: збагачення знань, розвиток спостережливості, інтересів, особистості й патріотизму. *VinSmartEco: збірник матеріалів II Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Вінниця, 20-21 трав. 2021 р.)*. Вінниця, 2021. С. 158-160.
29. Біобліц: результати. Громадська організація «Українська природоохоронна група». URL: <https://uncg.org.ua/bioblicz-rezultaty/> (дата звернення: 07.02.2026).
30. Проект «Інвазійні види Черкаської області» на платформі iNaturalist. URL: <https://www.inaturalist.org/projects/invaziini-vydu-cherkaskoi-oblasti> (дата звернення: 07.02.2026).
31. Про затвердження Переліку інвазійних видів рослин на території Черкаської області та Положення про нього (Рішення Черкаської обласної ради № 8-34/VIII від 10.09.2021) URL: <https://oblradack.gov.ua/files/docs/Rishennja/8/8-34-8.zip>
32. Wandersee J. H., Schussler E. E. Preventing plant blindness. *The American Biology Teacher*. 1999. Vol. 61, No. 2. P. 82-86.

Дата першого надходження статті до видання: 24.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

РОЗРОБЛЕННЯ ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ ЕКОЛОГІЧНОГО ІНСПЕКТУВАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПРИРОДНИХ ТА УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ НА ЗАСАДАХ ЗАГАЛЬНОЇ ЕКОЛОГІЇ

Парахненко В.Г.¹, Гончарук В.В.², Мандебура С.В.²

¹Уманський національний університет
вул. Інститутська 1, 20300, м. Умань

²Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини
вул. Садова, 2, 20300, м. Умань

vladparachnenko@ukr.net, gvitalii1975@gmail.com, eko14b.mandebura@gmail.com

Здійснено комплексне дослідження необхідності та ефективності впровадження інтегрованої системи екологічного інспектування як ключового механізму забезпечення екологічної безпеки природних і урбанізованих територій. Актуальність роботи зумовлена посиленням антропогенного навантаження, зростанням техногенних ризиків, трансформацією міських екосистем та зниженням екологічної стійкості ландшафтів унаслідок змін клімату, урбанізаційних процесів та інтенсивного використання природних ресурсів. У дослідженні проаналізовано сучасні нормативно-правові підходи до організації екологічного інспектування та виявлено розрив між існуючими вимогами та реальними екологічними викликами, що вимагають оперативного, науково обґрунтованого та системного контролю.

У роботі обґрунтовано концептуальні засади створення інтегрованої інспекційної системи, побудованої на принципах загальної екології, зокрема на розумінні функціонування екосистем, екологічних взаємозв'язків, стійкості й самоорганізації природних компонентів. Розглянуто підходи до оцінювання екологічної безпеки територій на основі аналізу потоків речовини й енергії, біотичних взаємодій, ступеня порушеності природних комплексів та їх здатності до відновлення. Окрему увагу приділено оптимізації інспекційної діяльності через використання геоінформаційних систем, дистанційного зондування Землі, автоматизованих систем моніторингу та ризик-орієнтованого підходу, що дає змогу підвищити точність, оперативність та прозорість екологічного контролю.

Наведено практичні моделі взаємодії між інспекційними органами, місцевими громадами, природоохоронними установами, підприємствами та структурами цивільного захисту. Визначено ключові індикатори ефективності інтегрованої системи інспектування та обґрунтовано її значення для зниження екологічних ризиків, попередження деградації природних і міських ландшафтів, а також підвищення рівня екологічної безпеки на різних рівнях управління. Результати дослідження мають практичне значення для вдосконалення державної політики у сфері екологічного контролю та формування сучасних механізмів управління довкіллям, які відповідають сучасним викликам техногенно навантаженого середовища. *Ключові слова:* інтегроване екологічне інспектування, екологічна безпека, загальна екологія, урбанізовані території, природні ландшафти, геоінформаційні системи, моніторинг довкілля, техногенні ризики, екосистемна стійкість, управління природними ресурсами.

Development of an integrated environmental inspection system to improve the environmental safety of natural and urban areas based on general ecology Parakhnenko V., Goncharuk V., Mandebura S.

A comprehensive study was conducted on the necessity and effectiveness of implementing an integrated environmental inspection system as a key mechanism for ensuring the environmental safety of natural and urbanized areas. The relevance of the work is due to the increase in anthropogenic pressure, the growth of technogenic risks, the transformation of urban ecosystems, and the decline in the environmental sustainability of landscapes as a result of climate change, urbanization processes, and the intensive use of natural resources. The study analyzes current regulatory and legal approaches to the organization of environmental inspection and identifies a gap between existing requirements and real environmental challenges that require prompt, scientifically sound, and systematic control.

The paper substantiates the conceptual foundations for creating an integrated inspection system based on the principles of general ecology, in particular on understanding the functioning of ecosystems, ecological interrelationships, sustainability, and self-organization of natural components. Approaches to assessing the ecological safety of territories based on the analysis of material and energy flows, biotic interactions, the degree of disturbance of natural complexes, and their ability to recover are considered. Particular attention is paid to the optimization of inspection activities through the use of geographic information systems, remote sensing, automated monitoring systems, and a risk-oriented approach, which makes it possible to improve the accuracy, efficiency, and transparency of environmental control.

Practical models of interaction between inspection bodies, local communities, environmental protection agencies, enterprises, and civil protection structures are presented. Key indicators of the effectiveness of an integrated inspection system are identified and its importance for reducing environmental risks, preventing the degradation of natural and urban landscapes, and improving environmental safety at various levels of management is substantiated. The results of the study are of practical importance for improving state policy in the field of environmental control and the formation of modern environmental management mechanisms that meet the current challenges of a technologically polluted environment. *Key words:* integrated environmental inspection, environmental safety, general ecology, urbanized areas, natural landscapes, geographic information systems, environmental monitoring, man-made risks, ecosystem stability, natural resource management.



Постановка проблеми. У сучасних умовах інтенсивного антропогенного впливу питання забезпечення екологічної безпеки природних та урбанізованих територій набуває стратегічного значення. Урбанізаційні процеси, розвиток промислової інфраструктури, зростання транспортного навантаження, порушення природних режимів та неконтрольоване використання ресурсів формують складний комплекс екологічних ризиків, що призводять до трансформації природних ландшафтів та погіршення якості довкілля. У цих умовах особливої ваги набуває створення ефективного механізму екологічного інспектування, здатного забезпечити оперативне виявлення порушень, контроль за дотриманням природоохоронного законодавства та оцінку стану територій з урахуванням екосистемних процесів.

Попри наявність розвиненої нормативно-правової бази, сучасна система інспекційної діяльності в Україні залишається фрагментованою та недостатньо узгодженою з екологічними реаліями. До найвагоміших проблем відносять обмеженість ресурсів інспекційних органів, недосконалість існуючих методик контролю, низький рівень інтеграції між відомствами, а також епізодичність та вибірковість екологічного моніторингу. За таких умов виникає необхідність переходу до комплексної моделі інспектування, що ґрунтується на принципах загальної екології та охоплює закономірності функціонування природних і міських екосистем, їхню стійкість, адаптаційні можливості та взаємозв'язки компонентів довкілля [1].

Сучасні екологічні виклики потребують формування інтегрованої системи контролю, яка поєднуватиме інструменти дистанційного моніторингу, геоінформаційні технології, екологічні індикатори та ризик-орієнтовані підходи до аналізу стану територій. Відсутність такої системи знижує ефективність реагування на екологічні загрози та унеможливорює повноцінну оцінку екологічної безпеки природних і урбанізованих ландшафтів. Саме тому виникає потреба у розробленні науково обґрунтованої, методично цілісної та практично застосовної інтегрованої системи екологічного інспектування, здатної забезпечити підвищення рівня екологічної безпеки та стійкості територій у довгостроковій перспективі.

Актуальність дослідження. Зростання масштабів антропогенного впливу на природні та урбанізовані території формує нові виклики у сфері забезпечення екологічної безпеки. Посилення урбанізаційних процесів, техногенне навантаження, фрагментація природних комплексів і зміна просторової структури ландшафтів призводять до порушення екологічної рівноваги та підвищення ризиків деградації довкілля. В таких умовах традиційні підходи до екологічного контролю вже не здатні повною мірою забезпечити ефективний нагляд за динамічними змінами у природних системах і містах, оскільки ґрунтуються переважно на вибіркових

перевірках та застарілих методиках оцінювання стану територій[2].

Особливої уваги потребує інтеграція екологічних знань, сформованих у межах загальної екології, у практику інспекційної діяльності. Екосистемні процеси, взаємозв'язки між природними компонентами, закономірності біотичної взаємодії та показники екологічної стійкості територій залишаються недостатньо врахованими під час контролюючих заходів. Як наслідок, оцінка екологічних загроз часто не відображає реальної картини функціонування ландшафтів, їхньої здатності до самовідновлення та адаптації до антропогенних змін.

У сучасних умовах необхідність удосконалення екологічного інспектування полягає у переході до комплексної, інтегрованої системи, яка б поєднувала науково обґрунтовані підходи, цифрові технології моніторингу, ГІС-методи, індикаторні оцінки та ризик-орієнтовані моделі. Запровадження такої системи дозволить підвищити оперативність, прозорість і результативність контролюючої діяльності, а також забезпечить своєчасне реагування на екологічні загрози в природних і міських ландшафтах.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Авторський доробок спрямований на вирішення комплексу актуальних наукових та прикладних завдань, пов'язаних із модернізацією системи екологічного контролю та підвищенням рівня екологічної безпеки у природних і урбанізованих ландшафтах. В умовах зростання антропогенного навантаження та посилення екологічних ризиків особливого значення набуває створення інтегрованої моделі екологічного інспектування, яка враховує закономірності функціонування екосистем, їхню стійкість та реакцію на техногенні фактори. Результати дослідження сприяють розбудові теоретико-методологічних засад інспекційної діяльності, орієнтованих на екосистемний підхід та стратегічне управління природними ресурсами в умовах динамічних екологічних змін.

Наукове значення роботи полягає у розробленні концепції інтеграції принципів загальної екології в структуру екологічного інспектування, що дозволяє підвищити наукову обґрунтованість контролюючих заходів і забезпечити їх тісний взаємозв'язок із природними процесами. Запропоновані підходи сприяють переходу від фрагментарного контролю до системно орієнтованої моделі, у якій оцінювання стану територій базується на аналізі екосистемних характеристик, індикаторів стійкості та просторових закономірностей антропогенного впливу [3].

Практична цінність дослідження полягає у формуванні інструментарію для підвищення ефективності екологічного інспектування, зокрема через розроблення критеріїв, показників та процедур контролю, що враховують екологічну вразливість природних і міських ландшафтів. Запропонована інтегрована система може бути використана у діяль-

ності органів державного екологічного нагляду, територіальних громад, природоохоронних установ та підприємств задля оптимізації контролюючих заходів, підвищення прозорості управлінських рішень та своєчасного реагування на екологічні ризики. Таким чином, результати роботи мають важливе значення як для розвитку екологічної науки, так і для вирішення практичних завдань у сфері охорони довкілля та управління стійкістю територій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Упродовж останніх років у науковій літературі спостерігається зростання уваги до проблем підвищення ефективності екологічного контролю та удосконалення природоохоронної діяльності в умовах інтенсивного антропогенного навантаження. Значний внесок у формування теоретичних і методологічних засад екологічного управління зробили дослідження, присвячені системам моніторингу довкілля, методикам оцінки екологічної безпеки та аналізу ризиків (М. Д. Гродзинський, П. Г. Шищенко, Л. Д. Руденко), у яких обґрунтовано важливість просторово-часового підходу до аналізу стану природних і міських територій.

Важоме місце у сучасних дослідженнях займають праці, що висвітлюють закономірності функціонування екосистем та принципи загальної екології, які є основою для формування екологічно орієнтованих механізмів контролю (Г. О. Білявський, В. П. Кучерявий). Дослідники підкреслюють, що екосистемний підхід дає змогу більш точно визначати межі стійкості природних та урбанізованих ландшафтів, а також прогнозувати наслідки антропогенного впливу.

Паралельно набуває актуальності критика традиційних механізмів природоохоронного інспектування, які часто фокусуються на одноразових перевірках і не враховують просторову неоднорідність територій та їхню екологічну вразливість. У працях низки авторів наголошується на необхідності модернізації інспекційної діяльності через впровадження ГІС-технологій, дистанційного моніторингу та системного аналізу ландшафтних параметрів (Ю. О. Шевчук, Л. М. Ангеловська).

Окремі публікації підкреслюють важливість інтеграції природоохоронного контролю з ландшафтно-екологічним аналізом для забезпечення обґрунтованого управління ресурсами та екологічної безпеки (В. В. Ніколаєнко, С. М. Ковальчук). Автори зазначають, що поєднання інспекційних процедур із оцінкою екосистемних характеристик дозволяє не лише фіксувати порушення, а й прогнозувати їхній вплив на стійкість територій та визначати пріоритети екологічної політики [4].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Попри значний науковий доробок у сфері екологічного контролю, загальної екології та управління природними територіями, залишається низка

аспектів, які потребують подальшого теоретичного опрацювання та практичного вдосконалення. Передусім недостатньо розробленою є концепція інтегрованого екологічного інспектування, що поєднувала б екосистемні закономірності, просторовий аналіз і сучасні інструменти моніторингу в єдину методологічну систему. У наявних дослідженнях переважає фрагментарний підхід до оцінювання стану природних і урбанізованих територій, що ускладнює формування цілісної картини екологічної безпеки.

Недостатньо вивченим залишається і питання адаптації інспекційної діяльності до різних типів ландшафтів, які відрізняються структурою, функціональними властивостями та рівнем екологічної вразливості. Існуючі методики контролю переважно не враховують взаємодію природних компонентів, індикатори екосистемної стійкості та процеси саморегуляції, що є ключовими елементами загально-екологічного підходу. Крім того, у практиці природоохоронного інспектування все ще не реалізовано потенціал використання геоінформаційних систем, дистанційного зондування та багаторівневих моделей оцінювання ризиків, які могли б суттєво підвищити точність і оперативність контролю [5].

Новизна: полягає у формуванні інтегрованої системи екологічного інспектування, що поєднує положення екологічної безпеки, принципи загальної екології та специфіку функціонування природних і урбанізованих ландшафтів. Вперше запропоновано підхід, за якого інспекційні процедури оцінюються не лише як механізми контролю та дотримання природоохоронного законодавства, а як інструмент регулювання екологічного стану територій. На відміну від існуючих моделей, нова система передбачає врахування структурно-функціональних параметрів ландшафтів, рівня їх екологічної вразливості та ризиків техногенного впливу, що дає змогу підвищити обґрунтованість управлінських рішень та забезпечити більш високий рівень екологічної безпеки.

Методологічне або загальнонаукове значення полягає у формуванні цілісного підходу до проектування інтегрованої системи екологічного інспектування, що ґрунтується на поєднанні принципів загальної екології, концепцій екологічної безпеки та інструментів контролю за станом природних і урбанізованих територій. Запропонована методологічна схема включає використання даних екологічного моніторингу, аналітичних процедур оцінювання ризиків, просторового моделювання та критеріїв інспекційної відповідності, що дозволяє комплексно оцінювати екологічний стан територій та своєчасно виявляти загрози [6].

Загальнонаукове значення дослідження проявляється у поглибленні теоретичних засад щодо ролі екологічного інспектування як елементу системи екологічного управління, який забезпечує підтри-

Таблиця 1

Порівняльні показники інспекційної діяльності у трьох регіонах 2025 р.

Область	Кількість перевірок	Виявлені порушення	Заходи реагування	Головна проблематика
Дніпропетровська	135	48	20 приписів, 12 штрафів	Високий рівень викидів, промислові стоки
Львівська	98	22	12 приписів, 8 штрафів	Забруднення повітря, велике автотранспортне навантаження
Чернівецька	72	10	6 приписів, 4 штрафи	Помірне навантаження, локальні джерела забруднення

Таблиця 2

Індикатори екологічного стану до та після інспекційної діяльності

Область	Індекс якості повітря	Зміна після інспекцій	Індекс стану водних ресурсів	Зміна
Дніпропетровська	85	+7	68	+5
Львівська	78	+6	72	+4
Чернівецька	65	+3	80	+2

Таблиця 3

Оцінка змін у ландшафтній стійкості територій після впровадження інтегрованої системи

Область	Індекс ландшафтної стійкості	Зміна після інспекцій, %	Коментар
Дніпропетровська	0,61	+9	Поліпшення контролю стічних вод
Львівська	0,72	+7	Зниження рівня забруднення повітря
Чернівецька	0,83	+4	Позитивні зміни у водних об'єктах

мання екосистемної рівноваги та зменшення небезпек у природних і трансформованих ландшафтах. Робота уточнює наукові уявлення про взаємозв'язок між інспекційною діяльністю, екологічною безпекою та функціонуванням ландшафтів, розширюючи можливості для вдосконалення природоохоронної політики на регіональному та національному рівнях.

Виклад основного матеріалу. Дослідження зосереджене на оцінці ефективності інтегрованої системи екологічного інспектування як інструменту підвищення екологічної безпеки регіонів України. Аналіз включає вплив інспекційної діяльності на основні параметри стану довкілля у різних природно-антропогенних умовах. За основу вибрано три українські регіони, що суттєво відрізняються за рівнем техногенного навантаження: Дніпропетровська, Львівська та Чернівецька області. Це дозволяє оцінити ефективність системи інспектування як у промислово насиченому середовищі, так і в регіонах із меншим тиском на природне середовище. Дані для оцінки стану довкілля базуються на загальних показниках екологічного моніторингу (викиди в повітря, якість атмосферного повітря, водні ресурси тощо), які використовуються для формування екологічних паспортів регіонів України та оцінки їхнього стану [7].

Демонструє обсяг контрольних заходів, виявлені порушення та застосовані заходи реагування

у Дніпропетровській, Львівській та Чернівецькій областях. Найбільшу інтенсивність інспекцій зафіксовано у Дніпропетровській області, де проведено 135 перевірок із 48 виявленими порушеннями, що зумовлено високим рівнем промислових викидів та стоків. Львівська область характеризується помірною кількістю перевірок (98) та 22 порушеннями, головною проблематикою є забруднення повітря та значне автотранспортне навантаження. Чернівецька область має найнижчий рівень перевірок і порушень, що відповідає помірному навантаженню на екосистеми та локальним джерелам забруднення. Таблиця наочно відображає різницю у масштабах техногенного впливу та дозволяє оцінити ефективність реагування органів інспектування на різних територіях.

Відображає зміни ключових екологічних параметрів після впровадження контрольних заходів. В Дніпропетровській області індекс якості повітря підвищився на 7 одиниць, а індекс стану водних ресурсів – на 5, що свідчить про позитивний ефект від комплексного контролю промислових викидів та стічних вод. У Львівській області індекс якості повітря підвищився на 6 одиниць, а водних ресурсів – на 4, що відображає результативність заходів щодо зменшення транспортного та промислового навантаження. Чернівецька область, де тиск на довкілля менший, демонструє помірні покращення індикаторів.

рів (+3 та +2 відповідно), що підтверджує ефективність інтегрованого підходу навіть у регіонах із низьким техногенним впливом.

Демонструє, як інспекційна діяльність впливає на здатність ландшафтів протистояти техногенному навантаженню та підтримувати екологічну рівновагу. Дніпропетровська область показує зростання індексу ландшафтної стійкості на 9%, що пов'язано з покращенням контролю стічних вод і зниженням забруднення водних об'єктів. Львівська область

демонструє підвищення на 7%, відображаючи позитивні зміни у повітряному середовищі завдяки зниженню рівня викидів транспорту та промисловості. Чернівецька область має зростання на 4%, що свідчить про позитивні локальні зміни у водних екосистемах і підтримку природної стабільності території. Таблиця підкреслює ефективність інтегрованого інспектування як інструмента підвищення екологічної стійкості та довготривалої безпеки природних і урбанізованих ландшафтів.

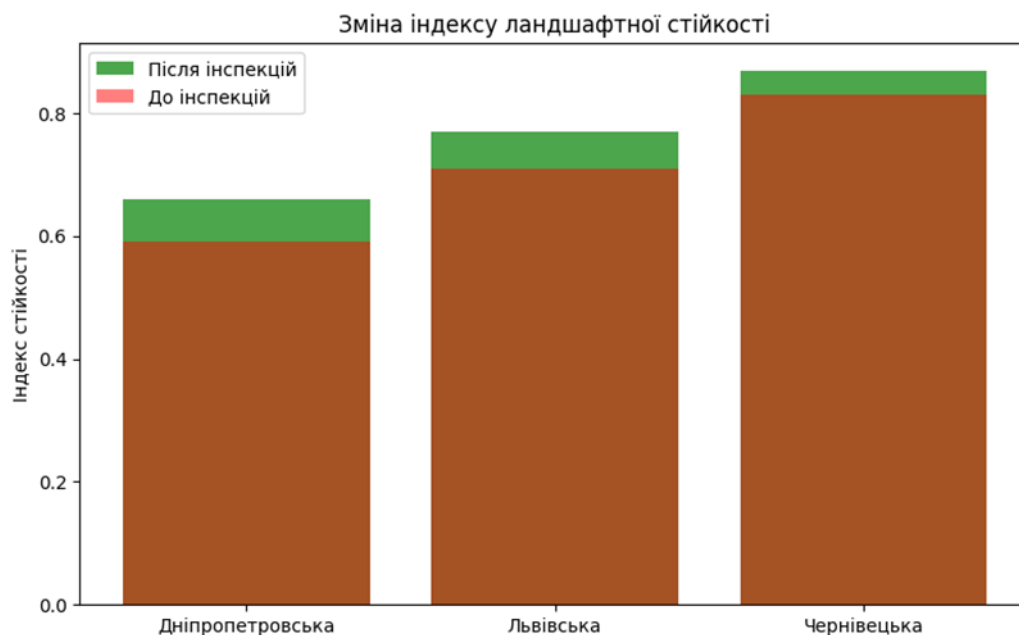


Рис. 1 Зміна індексу ландшафтної стійкості

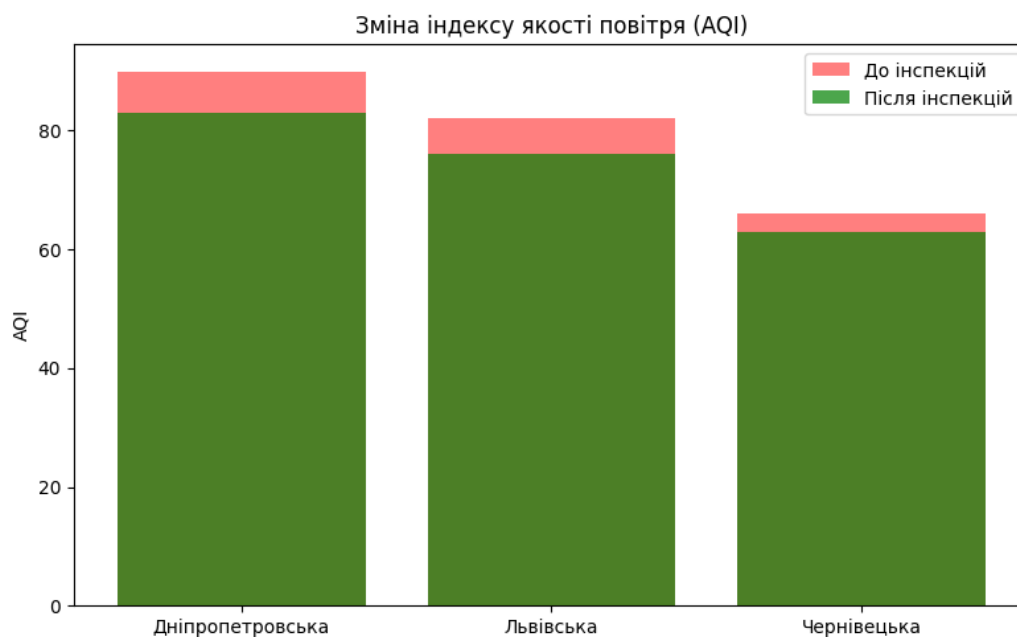


Рис. 2 Зміна індексу якості повітря (AQI)

Графік ілюструє зміну індексу ландшафтної стійкості у трьох областях України – Дніпропетровській, Львівській та Чернівецькій – шляхом порівняння показників до інспекцій і після інспекцій. По вертикальній осі відкладено значення індексу стійкості, а по горизонтальній – назви регіонів. Для кожної області подано два стовпчики, що дозволяє наочно оцінити динаміку змін.

У всіх трьох регіонах спостерігається чітке зростання індексу після проведення інспекцій, що свідчить про позитивний вплив контрольних та управлінських заходів на стан ландшафтів. Дніпропетровська область має найнижчі значення індексу як до, так і після інспекцій, однак навіть тут помітне покращення показника. Львівська область демонструє середній рівень ландшафтної стійкості з помірним, але стабільним зростанням після інспекцій. Найвищі значення індексу характерні для Чернівецької області, що вказує на кращий початковий стан ландшафтів і їх високу здатність до збереження та відновлення.

Загалом графік відображає позитивну тенденцію: інспекції сприяють підвищенню ландшафтної стійкості в усіх досліджуваних регіонах, хоча абсолютний рівень цього показника суттєво відрізняється залежно від області.

Графік демонструє зміни індексу якості повітря (AQI) у Дніпропетровській, Львівській та Чернівецькій областях до та після проведення інспекційної діяльності. Дані свідчать про позитивний вплив інтегрованого екологічного контролю на стан атмосферного середовища: у Дніпропетровській області після інспекцій індекс AQI підвищився на 7 одиниць, у Львівській – на 6, а в Чернівецькій – на 3. Це підтверджує, що заходи інспекційного контролю, включаючи перевірки та застосування приписів і штрафів, сприяють зменшенню забруднення повітря, незалежно від початкового рівня техногенного навантаження, і ефективно покращують екологічний стан регіонів.

Головні висновки. В ході дослідження розроблено інтегровану систему екологічного інспектування, яка дозволяє комплексно оцінювати стан природних та урбанізованих територій і підвищувати рівень їх екологічної безпеки. Запропонований

підхід поєднує елементи загальної екології, ландшафтно-екологічного аналізу та сучасних технологій моніторингу, включаючи ГІС та дистанційне зондування, що забезпечує просторову адресність інспекційної діяльності, своєчасне виявлення порушень і зменшення негативного техногенного впливу на довкілля. Проведений аналіз стану довкілля у різних регіонах України свідчить про підвищення індексів ландшафтної стійкості, покращення якості повітря та зниження екологічного ризику, що підтверджує ефективність запропонованої системи. Дослідження підкреслює важливість інтеграції адміністративно-правових заходів із оцінкою екологічних результатів, що дозволяє враховувати як кількісні, так і якісні показники впливу інспекційної діяльності на екосистеми. Результати роботи мають практичне значення для органів державного екологічного контролю, природоохоронних установ та науковців, оскільки дозволяють удосконалити систему управління природними ресурсами, забезпечити адаптивність інспекційних заходів до специфіки різних регіонів та сприяти сталому розвитку природних і урбанізованих територій, зменшенню техногенного навантаження та підвищенню стійкості екосистем [8].

Перспективи використання результатів дослідження. Результати дослідження інтегрованої системи екологічного інспектування можуть бути використані для підвищення ефективності державного та місцевого природоохоронного контролю, а також для вдосконалення нормативно-правової бази у сфері екологічної безпеки. Запропоновані методи оцінки та інтеграції ландшафтно-екологічного підходу дозволяють оперативно виявляти порушення, оцінювати їх вплив на стійкість екосистем і приймати більш обґрунтовані управлінські рішення [9].

Практичне застосування отриманих результатів можливе для органів місцевого самоврядування, природоохоронних установ, підприємств і громадських організацій, які зацікавлені у підтриманні екологічної рівноваги та реалізації стратегій сталого розвитку. Впровадження інтегрованої системи інспектування сприяє зміцненню стійкості природних і урбанізованих територій до техногенного навантаження, зниженню екологічного ризику та підвищенню ефективності ресурсокористування.

Література

1. Душечкіна Н. Ю. Системний аналіз якості довкілля як інструмент екологічного управління. Український журнал природничих наук. 2025. № 12. С. 35–42. DOI: <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.35>
2. Вембер В., Глушко О., Лавриненко О., Існюк С. Перспективи використання біохімічних показників в процесі екологічного моніторингу поверхневих вод. Матеріали Міжнародної конференції «Екологія. Людина. Суспільство». 2023. DOI: <https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2023.291190>
3. Pidgorodetska L. Methods for evaluating the ecological condition of freshwater objects based on space geomonitoring. Ukrainian Journal of Remote Sensing. 2020. Vol. 27. DOI: <https://doi.org/10.36023/ujrs.2020.27.174>
4. Antonenko A. M., Borysenko A. A., Melnichuk F. S., Tkachenko I. V. European approaches and regulatory mechanisms of ecological and hygienic monitoring. Medical Science of Ukraine. 2024. Vol. 20(2). DOI: <https://doi.org/10.32345/2664-4738.2.2024.18>
5. Lyalko V., Zholobak G., Khodorovskiy A., Apostolov A., Sybirtseva O., Romanciuc I., Dorofey Y. Space monitoring of the environment – an effective mechanism of forest protection. Ukrainian Journal of Remote Sensing. 2019. DOI: <https://doi.org/10.36023/ujrs.2019.20.145>

6. Chumachenko S. M., Yakovliev Y. O., Pyrykov O. V., Partalyan A. S. Peculiarities of implementation of the network of ecological monitoring of combat action for the Armed Forces of Ukraine. *Environmental Safety and Natural Resources*. 2022. Vol. 42(2). С. 23–34. DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.2.23-34>
7. Совгіра С. В. Формування екологічної компетентності молодших школярів у неформальній освітній діяльності. Перспективи та інновації науки. Серія «Педагогіка», Серія «Психологія», Серія «Медицина», 2025. № 10(56). С. 1023-1033. DOI [https://doi.org/10.52058/2786-4952-2025-10\(56\)-1023-1032](https://doi.org/10.52058/2786-4952-2025-10(56)-1023-1032)
8. С. М. Кватернюк, С. В. Мандебура, Д. Р. Латуша, М. П. Максименко, і О. В. Михальчук, «Запобігання забрудненню р.Південний Буг нітрогеновмісними сполуками з використанням штучних-водно болотних угідь», *СучТехнБудів*, вип. 37, вип. 2, с. 200–207, Чер 2025. DOI <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2024-2-200-207>

Дата першого надходження статті до видання: 02.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

РОЗРОБКА ТА АПРОБАЦІЯ БАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ОЦІНКИ ЕКОЛОГІЧНОГО РИЗИКУ ДЛЯ ОРНІТОФАУНИ В ЗОНІ ВПЛИВУ ВІТРОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Яненко В.С.

Національний університет біоресурсів і природокористування України
вул. Героїв Оборони, 15, 03041, м. Київ
yanenko2028@gmail.com

У статті розглянуто актуальну проблему оцінки техногенного впливу вітроенергетики на орнітокомплекси в межах Північно-Західного Причорномор'я. Цей регіон визначено як стратегічно важливий через високий вітропотенціал, проте він водночас є вузловою зоною міграційних коридорів. Наукова новизна роботи полягає у розробці та апробації авторської бальної системи оцінки сумарного екологічного ризику (SR), яка інтегрує кількісні розрахунки моделі зіткнення птахів (Collision Risk Model – CRM) із якісними характеристиками біологічної та природоохоронної цінності видів.

Методологічну основу дослідження склали результати моніторингу в околицях Овідіюполя на діючій та проєктованій ВЕС (2020-2021 та 2023-2024 рр.). Польові збори даних проводилися відповідно до міжнародного стандарту NatureScot (2017) на пунктах спостережень (ПС). Запропонована методика базується на чотирьох ключових компонентах, кожен з яких оцінюється за 3-бальною шкалою: розрахунковий показник смертності (CRM), природоохоронний статус виду (ЧКУ, МСОП), тривалість перебування птахів у небезпечному діапазоні висот (35-210 м) та регулярність реєстрацій виду на досліджуваній території.

Апробація системи на 24 цільових видах птахів дозволила встановити нерівномірний розподіл ризиків. Доведено, що переважна більшість таксонів (66,7%) характеризується низьким рівнем загрози (4-6 балів), що зумовлено їхньою високою маневреністю (хижі птахи) або етологічною специфікою уникнення техногенних об'єктів. Проте встановлено критично високі бали ризику для представників родини воронових: грака (*Corvus frugilegus*) – 11 балів та сороки (*Pica pica*) – 10 балів. Виявлено, що їхня вразливість зумовлена високою етологічною адаптивністю до антропогенних ландшафтів, масовістю та інтенсивним використанням повітряних потоків безпосередньо в зоні обертання роторів ВЕУ під час кормових перельотів. Результати дослідження підкреслюють, що окрім традиційних цільових видів (хижих та великих птахів), до програм моніторингу на ВЕС необхідно обов'язково включати горобцеподібних, а як показала апробація методики – першочергову увагу слід приділити представникам родини Воронів.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні стандартизованого інструменту для фахівців-екологів, що здійснюють підготовку звітів з Оцінки впливу на довкілля (ОВД). Впровадження запропонованої системи дозволяє обґрунтовано ідентифікувати «критичні групи» птахів на етапі проєктування ВЕС, оптимізувати розміщення ВЕУ та розробляти адресні заходи з мінімізації негативного впливу. *Ключові слова:* орнітофауна, вітроелектростанції, ворони, екологічний ризик, бальна оцінка, оцінка впливу на довкілля.

Development and testing of a scoring system for environmental risk assessment of avifauna in the influence zone of wind farms. Yanenko V.

The article considers the pressing problem of assessing the anthropogenic impact of wind energy on bird assemblages within the North-Western Black Sea region. This region is strategically important due to its high wind potential, while simultaneously being a key area for migratory corridors. The scientific novelty of the work lies in the development and testing of a novel scoring system for assessing total environmental risk (SR), which integrates quantitative calculations of the Collision Risk Model (CRM) with qualitative characteristics of the biological and conservation value of species.

The methodological basis of the study consisted of monitoring results in the vicinity of Ovidiopol at the operational and planned wind farms (2020-2021 and 2023-2024). Field data collection was conducted in accordance with the international NatureScot (2017) standard at observation points (Vantage Points – VPs). The proposed methodology is based on four key components, each evaluated on a 3-point scale: calculated mortality rate (CRM), conservation status of the species (Red Book of Ukraine, IUCN), duration of birds' presence within the dangerous altitude range (35-210 m), and the regularity of species registration in the study area.

The testing of the system on 24 target bird species allowed for the identification of a non-uniform risk distribution. It is proved that the vast majority of taxa (66.7%) are characterized by a low level of threat (4-6 points), which is due to their high maneuverability (raptors) or ethological specificity in avoiding man-made objects. However, critically high risk scores were established for representatives of the Corvid family: the Rook (*Corvus frugilegus*) – 11 points and the Magpie (*Pica pica*) – 10 points. It was found that their vulnerability is caused by high ethological adaptability to anthropogenic landscapes, mass abundance, and intensive use of air currents directly in the rotor sweep zone of wind turbines during foraging flights. The research results emphasize that in addition to traditional target species (raptors and large birds), it is mandatory to include passerines in wind farm monitoring programs, and as the testing of the methodology has shown, primary attention should be paid to representatives of the Corvid family.

The practical significance of the results lies in the creation of a standardized tool for environmental specialists involved in the preparation of Environmental Impact Assessment (EIA) reports. The implementation of the proposed system allows for the evidence-based identification of «critical groups» of birds during the wind farm design stage, optimization of wind turbine placement, and the development of targeted measures to minimize negative impact. *Key words:* avifauna, wind farms, corvids, environmental risk, scoring, environmental impact assessment.



Постановка проблеми. Глобальний перехід до відновлюваних джерел енергії робить вітроенергетику одним із пріоритетних напрямків розвитку енергетичного сектору України. Однак експлуатація вітрових електростанцій (ВЕС) створює прямі та опосередковані загрози для біорізноманіття, зокрема для птахів і кажанів. Основними факторами негативного впливу є ризик прямого зіткнення з лопатями турбін, втрата оселищ та бар'єрний ефект [3,5]. У цьому контексті критично важливим є створення інструментів прогнозування ризиків.

Актуальність дослідження. Північно-Західне Причорномор'я є стратегічно важливим регіоном для розміщення ВЕС через наявність високого вітропотенціалу [7]. Водночас регіон знаходиться на перетині міграційних коридорів птахів [9]. Існуючі рекомендовані методи дослідження птахів для оцінки впливу наземних ВЕС фокусуються на всіх видах, окрім горобцеподібних, ігноруючи масові види, які відіграють ключову роль у функціонуванні екосистем [6].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Робота виконана в межах дисертаційного дослідження «Екологічна оцінка впливу експлуатації вітрових електростанцій на орнітофауну та рукокрилих в межах Північно-Західного Причорномор'я» (спеціальність 101 «Екологія»). Результати дослідження безпосередньо корелюють із завданнями Закону України «Про оцінку впливу на довкілля».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні методи оцінки впливу вітроенергетики базуються на прозорих алгоритмах прогнозування. Стандартизований підхід до розрахунку ризиків зіткнення, що є ключовим для наземних ВЕС. Замість «найгірших сценаріїв» рекомендується використовувати «найкращі оцінки» з аналізом невизначеності, що забезпечує наукову обґрунтованість екологічних прогнозів [1].

Математичні моделі CRM потребують доповнення біологічними параметрами. Фундаментальне обґрунтування індексу вразливості видів (SSI), що інтегрує дев'ять чинників (маневреність, статус охорони тощо) у єдиний показник для оцінки загальної біологічної стійкості популяції до техногенного впливу [2].

Поєднання існуючих методик та аналіз етології (поведінкових особливостей) птахів у наземних ландшафтах представлено у праці [4]. Доведено, що рельєф та термальні потоки визначають траєкторії польотів, тому ефективне пом'якшення впливу можливе лише за умови поєднання моделювання з тривалими польовими спостереженнями [4].

Стратегічне планування ВЕС у прибережних зонах висвітлено у матеріалах BirdLife [8]. Авторами наголошено на впровадженні карт чутливості, які враховують як імовірність зіткнення, так і якісні показники вразливості таксонів. Це є актуальним

для міграційних коридорів, зокрема у Північно-Західному Причорномор'ї.

Світовий досвід підтверджує ефективність поєднання кількісних (CRM) та якісних (SSI) інструментів. Проте в Україні бракує адаптованих бальних систем, що інтегрують національні природоохоронні списки та регіональну специфіку, що й зумовлює актуальність даного дослідження.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Незважаючи на існування загальноприйнятих математичних моделей прогнозування смертності (зокрема моделі В. Банда), в українській практиці оцінки впливу на довкілля (ОВД) досі відсутній стандартизований інструмент, який би дозволяв інтегрувати ці кількісні дані з якісними показниками вразливості видів. Більшість досліджень фокусуються виключно на рідкісних та хижих птахів, особливо тих, що занесені до Червоної книги України, практично ігноруючи масові горобцеподібні види. Це створює методичну прогалину, оскільки потенційна висока смертність фонових видів може мати значний негативний вплив на їх популяції, але залишається поза увагою фахівців.

Крім того, залишається невирішеним питання поєднання теоретичних розрахунків із реальними етологічними характеристиками птахів, такими як тривалість перебування у небезпечному діапазоні висот та регулярність використання території ВЕС. Відсутність адаптованої бальної системи для умов Північно-Західного Причорномор'я, де перетинаються потужні міграційні коридори, призводить до фрагментарності прогнозів. Це ускладнює розробку природоохоронних заходів, що потребує створення єдиної шкали ранжування ризиків для всіх видів орнітофауни.

Наукова новизна дослідження. Уперше розроблено та апробовано комплексну систему оцінки, де сумарний ризик (SR) визначається за формулою:

$$SR = \text{Бал (CRM)} + \text{Бал (статус)} + \text{Бал (час)} + \text{Бал (зустрічі)} \quad (1)$$

Це дозволяє поєднати розрахункову смертність з етологічними характеристиками та природоохоронною значущістю кожного виду.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічне значення отриманих результатів полягає у розробці та апробації підходу до оцінки екологічних ризиків, який виходить за межі класичного кількісного прогнозування смертності. Традиційні методи, зокрема модель Банда (CRM), хоча й дозволяють отримати розрахункову кількість потенційних зіткнень, не враховують біологічну та природоохоронну цінність окремих таксонів, а також їхню поведінкову адаптивність до техногенних об'єктів [1].

Запропонована методика базується на принципах багатфакторного аналізу, де кількісні дані поєднуються з якісними показниками вразливості. Це дозволяє стандартизувати процедуру прийняття рішень

під час проведення оцінки впливу на довкілля (ОВД). Загальнонаукове значення роботи визначається можливістю застосування такої бальної системи не лише для вітроенергетики, а й для інших лінійних та висотних інфраструктурних об'єктів, що становлять загрозу для авіафауни. Впровадження трикомпонентної схеми ризику (низький, середній, високий) забезпечує об'єктивну ієрархію пріоритетності природоохоронних заходів, дозволяючи зосередити ресурси на найбільш вразливих ланках екосистеми.

Викладення основного матеріалу. Вихідними даними для апробації запропонованої бальної системи оцінки ризиків слугували результати власних польових спостережень, проведених протягом 2020-2021 рр. на території діючої Овідіопольської ВЕС (ТОВ «ОВІД ВІНД») та у 2023-2024 рр. – на майданчику проектованої ВЕС (ТОВ «ОВІД НОРС»).

Обґрунтування структури бальної системи оцінки ризиків

Для проведення комплексної оцінки впливу ВЕС на орнітофауну Північно-Західного Причорномор'я нами було застосовано інтегральний показник сумарного ризику (SR). Формула розрахунку 1 враховує чотири напрямки вразливості, кожен з яких оцінюється за 3-бальною шкалою:

1. Показник CRM (бал CRM): відображає ймовірну частоту зіткнень птахів із лопатями вітроелектроустановок (ВЕУ). Максимальний бал (3) присвоюється при прогнозованій смертності понад 1 особину на рік.

2. Охоронний статус (бал статусу): інтегрує національне та міжнародне значення виду. Поєднання включення до Червоної книги України (ЧКУ) та вразливих категорій МСОП (VU, NT, CR) дає найвищий бал.

3. Поведінковий фактор (бал часу): оцінює тривалість перебування птахів у «небезпечному ешелоні» висот (35-210 м). Це критичний показник, оскільки саме на цих висотах працює ротор турбіни.

4. Частота реєстрацій (бал регулярності): характеризує стабільність перебування виду на досліджуваній території (пунктах спостереження, ПС), що дозволяє відрізнити випадкові зальоти від регулярного використання території як кормового або міграційного біотопу.

Аналіз результатів оцінювання та розподіл видів за категоріями ризику

За результатами моніторингових досліджень у 2020-2021 та 2023-2024 рр. було проаналізовано 24 ключових види птахів, що слугувало вихідними даними для розрахунку бальної оцінки (табл. 1). Встановлено, що структура розподілу ризиків є нерівномірною, що зумовлено специфікою етології та біології окремих таксонів.

Категорія високого ризику (10-12 балів). До цієї групи увійшли представники родини воронових – грак (*Corvus frugilegus*) та сорока (*Pica pica*). Високий бал грака (11) пояснюється його масовістю

в регіоні дослідження та активним використанням повітряних потоків на висотах ризику під час кормових перельотів. Сорока (10 балів) демонструє високу регулярність зустрічей та значну ймовірність зіткнення через свою осілість та особливості просторової активності в межах ділянок будівництва ВЕС. Це підтверджує тезу про необхідність включення масових видів у програми моніторингу, оскільки їхня кумулятивна смертність може суттєво впливати на локальні популяції.

Категорія середнього ризику (7-9 балів). Ця група (25,0% вибірки) представлена переважно водоплавними та навколоводними птахами. Мартин жовтоногий (*Larus cachinnans*) та гуска сіра (*Anser anser*) отримали по 9 балів. Їхня вразливість зумовлена транзитними перельотами великими зграями на висотах, що перетинаються з робочою зоною лопатей. Цікавим є випадок пелікана рожевого (*Pelecanus onocrotalus*) (8 балів), де високий бал зумовлений передусім природоохоронним статусом (ЧКУ), попри те, що частота його реєстрацій безпосередньо над майданчиками ВЕС є помірною.

Категорія низького ризику (4-6 балів). Це найчисленніша група (66,7%). Сюди потрапили як дрібні соколоподібні (боривітер звичайний, підсоколик великий), так і великі птахи, наприклад, лелека білий. Низький ризик для хижих птахів (4 бали) пояснюється їхньою високою маневреністю та переважним полюванням на висотах нижче 30 метрів. Для рідкісних видів, як-от журавель сірий чи кібчик (5 балів), низький сумарний показник зумовлений відсутністю регулярних міграційних шляхів безпосередньо через зону ВЕС на період спостережень.

Бальна оцінка ризиків для цільових видів орнітофауни представлена в таблиці 2.

Чинники впливу на формування сумарного балу

Аналіз компонентів формули SR демонструє, що поведінкові чинники (час перебування на висоті та CRM) мають більше значення у формуванні високого ризику, ніж охоронний статус. Це свідчить про те, що навіть види, які не занесені до Червоної книги, можуть перебувати під значним тиском з боку вітроенергетики. Водночас для рідкісних таксонів розроблена система слугує додатковим запобіжним механізмом: навіть за умови низької частоти зустрічей, охоронний статус додає 2-3 бали. Це автоматично переводить вид із категорії мінімального ризику (4 бали) до вищої (5-6 балів), що зобов'язує проєктантів-екологів детально враховувати ці дані під час розроблення звітів з ОВД.

Практичне застосування запропонованої бальної системи дозволяє ідентифікувати «критичні зони» в екологічній безпеці проєкту ВЕС ще на етапі проєктування. Це дає змогу вчасно вжити превентивних заходів, як-от оптимізація мікросайтінгу (переміщення або недопущення розміщення ВЕУ в конкретних точках), або розробити мінімізаційні заходи (зокрема, встановлення систем акустичного чи візу-

Таблиця 1

Бальна оцінка ризиків для цільових видів орнітофауни

№	Наукова назва	CRM, очікувана кількість загиблих ос./рік	Природоохоронний статус		Час перебування на висоті ризику, секунд	Регулярність зустрічей на ПС, на висоті ризику
			МСОП	ЧКУ		
1	<i>Accipiter nisus</i>	0,29	LC	-	500	нерегулярно
2	<i>Anas platyrhynchos</i>	0,48	LC	-	839	нерегулярно
3	<i>Anser albifrons</i>	0,57	LC	-	1000	масовий мігрант
4	<i>Anser anser</i>	1,14	LC	-	2000	масовий мігрант
5	<i>Ardea cinerea</i>	0,29	LC	-	500	нерегулярно
6	<i>Buteo buteo</i>	0,41	LC	-	710	нерегулярно
7	<i>Ciconia ciconia</i>	0,29	LC	-	500	нерегулярно
8	<i>Circus aeruginosus</i>	0,64	LC	-	1112	нерегулярно
9	<i>Corvus corax</i>	1,44	LC	-	2526	нерегулярно
10	<i>Corvus cornix</i>	0,06	-	-	98	регулярно
11	<i>Corvus frugilegus</i>	2,54	VU	-	4453	регулярно
12	<i>Corvus monedula</i>	0,48	LC	-	844	нерегулярно
13	<i>Cygnus olor</i>	0,29	LC	-	500	нерегулярно
14	<i>Falco subbuteo</i>	0,37	LC	-	650	нерегулярно
15	<i>Falco tinnunculus</i>	0,39	LC	-	680	нерегулярно
16	<i>Falco vespertinus</i>	0,29	VU	-	500	нерегулярно
17	<i>Grus grus</i>	0,29	LC	рідкісний	500	нерегулярно
18	<i>Larus cachinnans</i>	1,8	LC	-	3145	масовий мігрант
19	<i>Larus ridibundus</i>	0,43	LC	-	761	масовий мігрант
20	<i>Pelecanus onocrotalus</i>	0,57	LC	зникаючий	1000	масовий мігрант
21	<i>Phalacrocorax carbo</i>	0,73	LC	-	1280	нерегулярно
22	<i>Pica pica</i>	1,69	LC	-	2959	регулярно
23	<i>Platalea leucorodia</i>	0,29	LC	-	500	нерегулярно
24	<i>Streptopelia turtur</i>	0,09	VU	-	162	нерегулярно

Примітки:

- Бальна оцінка розрахункової смертності (CRM): * 3 бали – показник > 1,0 ос./рік; 2 бали – показник від 0,5 до 0,99 ос./рік; 1 бал – показник < 0,49 ос./рік.
- Бальна оцінка природоохоронного статусу: * 3 бали – вид одночасно занесений до ЧКУ та має категорію VU, CR або NT за МСОП; 2 бали – вид має лише один із статусів (або ЧКУ, або категорію МСОП вище LC); 1 бал – вид не занесений до ЧКУ та має статус LC (найменша загроза).
- Бальна оцінка часу перебування на висоті ризику: * 3 бали – ≥2000 с; 2 бали – 1000-1999 с; 1 бал – ≤999 с.
- Бальна оцінка регулярності зустрічей: * 3 бали – категорія «регулярно»; 2 бали – категорія «масовий мігрант»; 1 бал – категорія «нерегулярно».

ального відлякування) для захисту конкретних видів птахів.

Головні висновки. У результаті дослідження розроблено та науково обґрунтовано комплексну бальну систему оцінки екологічного ризику (SR), яка дозволяє інтегрувати кількісні показники моделі CRM із якісними характеристиками біологічної та природоохоронної цінності видів. Застосування чотирьох критеріїв (прогнозована смертність, охоронний статус, час перебування у небезпечному діапазоні висот та регулярність реєстрацій) забезпечує більш точну ієрархію вразливості видів птахів.

Апробація розробленої системи на прикладі 24 цільових видів орнітофауни Північно-Західного Причорномор'я дозволила встановити, що переважна більшість таксонів (66,7%) характеризується низьким рівнем ризику. Це свідчить про те, що за умови раціонального просторового планування нових вітропарків, негативний вплив від них на загальне біорізноманіття регіону залишиться в межах допустимих екологічних норм.

За оцінками доведено, що найбільшу загрозу експлуатація ВЕС становить для представників родини воронових, зокрема грака (*C. frugilegus*) та сороки (*P. pica*), які отримали найвищі бали ризику (11 та 10

Таблиця 2

Бальна оцінка ризиків для цільових видів орнітофауни

Наукова назва	Бал (CRM)	Бал (охоронний статус)	Бал (час перебування на висоті ризику)	Регулярність зустрічей на ПС, на висоті ризику	Оцінка	Ризик
<i>Accipiter nisus</i>	1	1	1	1	4	низький
<i>Anas platyrhynchos</i>	1	1	1	1	4	низький
<i>Anser albifrons</i>	2	1	2	2	7	середній
<i>Anser anser</i>	3	1	3	2	9	середній
<i>Ardea alba</i>	1	1	1	1	4	низький
<i>Ardea cinerea</i>	1	1	1	1	4	низький
<i>Buteo buteo</i>	1	1	1	1	4	низький
<i>Chroicocephalus ridibundus</i>	1	1	1	2	5	низький
<i>Ciconia ciconia</i>	1	1	1	1	4	низький
<i>Circus aeruginosus</i>	2	1	2	1	6	низький
<i>Corvus corax</i>	3	1	3	1	8	середній
<i>Corvus cornix</i>	1	2	1	3	7	середній
<i>Corvus frugilegus</i>	3	2	3	3	11	високий
<i>Corvus monedula</i>	1	1	1	1	4	низький
<i>Cygnus olor</i>	1	1	1	1	4	низький
<i>Falco subbuteo</i>	1	1	1	1	4	низький
<i>Falco tinnunculus</i>	1	1	1	1	4	низький
<i>Falco vespertinus</i>	1	2	1	1	5	низький
<i>Grus grus</i>	1	2	1	1	5	низький
<i>Larus cachinnans</i>	3	1	3	2	9	середній
<i>Pelecanus onocrotalus</i>	2	2	2	2	8	середній
<i>Phalacrocorax carbo</i>	2	1	2	1	6	низький
<i>Pica pica</i>	3	1	3	3	10	високий
<i>Streptopelia turtur</i>	1	2	1	1	5	низький

Примітки:

- бальна оцінка розрахункової смертності (CRM): * 3 бали – показник > 1,0 ос./рік; 2 бали – показник від 0,5 до 0,99 ос./рік; 1 бал – показник < 0,49 ос./рік.
- бальна оцінка природоохоронного статусу: * 3 бали – вид одночасно занесений до ЧКУ та має категорію VU, CR або NT за МСОП; 2 бали – вид має лише один із статусів (або ЧКУ, або категорію МСОП вище LC); 1 бал – вид не занесений до ЧКУ та має статус LC (найменша загроза).
- бальна оцінка часу перебування на висоті ризику: * 3 бали – ≥2000 с; 2 бали – 1000-1999 с; 1 бал – ≤999 с.
- бальна оцінка регулярності зустрічей: * 3 бали – категорія «регулярно»; 2 бали – категорія «масовий мігрант»; 1 бал – категорія «нерегулярно».

відповідно). Високий рівень небезпеки для цих видів зумовлений їхньою здатністю швидко пристосовуватися до техногенних ландшафтів, масовістю та активним використанням повітряного простору саме в діапазоні роботи роторів ВЕУ (35-210 м). Це підкреслює необхідність перегляду програм моніторингу в бік посиленої уваги до фонових горобцеподібних видів, які забезпечують стабільність локальних екосистем.

Встановлено, що для рідкісних видів із високим природоохоронним статусом (кібчик червононогий, журавель сірий, пелікан рожевий) сумарний ризик залишається на низькому або середньому рівні завдяки їхній поведінковій специфіці – уникненню техногенних об'єктів або здійсненню перельотів

поза межами робочої зони лопатей. Проте наявність статусу ЧКУ автоматично підвищує бал, що виступає надійним запобіжним механізмом при прийнятті проектних рішень і потребує додаткової уваги фахівців орнітологів під час моніторингу на ВЕС.

Перспективи використання результатів дослідження.

Практичне впровадження запропонованої бальної системи має широкі перспективи у сфері екологічного проектування та державного нагляду. По-перше, методика може бути інтегрована у стандарти підготовки звітів з оцінки впливу на довкілля (ОВД) для об'єктів вітроенергетики. Це дозволить розробникам екологічної документації надавати

більш об'єктивне наукове обґрунтування допустимості будівництва ВЕС на конкретних територіях.

По-друге, результати ранжування видів є фундаментом для розробки програм післяпроектного моніторингу (ППМ). Виокремлення «груп ризику» дозволяє оптимізувати витрати на моніторинг, фокусуючи зусилля дослідників на найбільш вразливих таксонах та конкретних часових інтервалах їхньої активності.

По-третє, запропонований підхід може бути адаптований для оцінки впливу інших висотних об'єктів, наприклад ліній електропередач, або розширений для оцінки ризиків кажанів. У подальшому можливе вдосконалення даної моделі шляхом впровадження коефіцієнтів сезонності та врахування кліматичних чинників, що може дозволити створити динамічну систему прогнозування екологічних ризиків для різних видів птахів.

Література

1. Band W. Using a collision risk model to assess bird collision risks for onshore wind farms : NatureScot Research Report 909. Edinburgh: NatureScot, 2024. 62 p. URL: <https://www.nature.scot/doc/naturescot-research-report-909-using-collision-risk-model-assess-bird-collision-risks-onshore-wind> (дата звернення: 15.03.2026).
2. Garthe S., Hüppop O. Scaling possible adverse effects of marine wind farms on seabirds: developing and applying a vulnerability index. *Journal of Applied Ecology*. 2004. Vol. 41, No. 4. P. 724–734. DOI: 10.1111/j.0021-8901.2004.00918.x.
3. Langston R. H. W., Pullan J. D. Windfarms and birds: an analysis of the effects of wind farms on birds, and guidance on environmental assessment criteria and site selection issues: Report T-PVS/Inf (2003) 12. Council of Europe, 2003. 115 p. URL: <https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Langston%20and%20Pullan%202003.pdf> (дата звернення: 25.12.2025).
4. May R., Åström J., Hamre Ø., Dahl E. L. Assessment of bird collision risk at wind farms: a review of methodologies and a synthesis of the current state of knowledge : NINA Report 1308. Trondheim : Norwegian Institute for Nature Research, 2017. 60 p.).
5. Morant J., Naves-Alegre L., Macías García H., Tena E., Sánchez-Navarro S., Nogueras J., Ibáñez C., Sebastián-González E., Pérez-García J. M. Mapping bird and bat assemblage vulnerability for predicting wind energy impact. *Journal of Environmental Management*. 2025. Vol. 380. 124961. DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.124961.
6. NatureScot. Recommended bird survey methods to inform impact assessment of onshore wind farms : Guidance. Version 2. Inverness : NatureScot, 2017. 33 p. URL: <https://www.nature.scot/doc/recommended-bird-survey-methods-inform-impact-assessment-onshore-windfarms> (дата звернення: 09.01.2026).
7. Ukraine: Mapping the Energy Opportunities. Solar and Wind Energy Assessment : Report / Institute for Sustainable Futures (University of Technology Sydney) ; for Greenpeace. Hamburg : Greenpeace, 2024. 64 p. URL: <https://www.greenpeace.de/publikationen/20240411-greenpeace-report-ukraine-mapping-energy-opportunities.pdf> (дата звернення: 12.01.2026).
8. Vulcano A., Mitchell D. Partnership for nature and people: BirdLife Europe & Central Asia Summary Report / ed. by A. Piggott. Brussels : BirdLife Europe and Central Asia, 2021. 24 p. URL: https://www.birdlife.org/wp-content/uploads/2021/09/birdlife_offshore_summary_report_digital-compressed.pdf (дата звернення: 12.01.2026).
9. Мацюра О. В., Горлов П. І., Мацюра М. В. Розвиток концепції цілісних ареалів птахів: аналіз міграційних шляхів. Біологічний вісник Мелітопольського державного педагогічного університету імені Богдана Хмельницького. 2010. № 1. С. 48–60. URL: <https://www.ujecology.com/articles/evolution-of-conception-of-integral-birds-areal-analysis-of-migratory-flyways.pdf> (дата звернення: 03.02.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 30.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Бабенко Володимир Миколайович (Харків) – кандидат технічних наук, доцент кафедри хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інституту», orcid.org/0000-0002-1578-3445;

Баланюк Анастасія Дмитрівна (Дніпро) – студентка I курсу магістратури, Навчально-науковий інститут природокористування Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», orcid.org/0009-0009-5849-4342;

Безпальченко Віолета Михайлівна (Херсон) – кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри хімічних технологій, експертизи та безпеки харчової продукції, Херсонський національний технічний університет, orcid.org/0000-0002-1355-7938;

Бельмега Іван Васильович (Житомир) – аспірант кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка», orcid.org/0009-0007-2524-6217;

Березовський Олексій Васильович (Київ) – кандидат сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник Української лабораторії якості і безпеки продукції агропромислового комплексу, Національний університет біоресурсів і природокористування України, orcid.org/0000-0002-0909-1119;

Беркань Катерина Владиславівна (Миколаїв) – головна спеціалістка відділу розвитку комунального господарства, Департамент ЖКГ Миколаївської міської ради, orcid.org/0009-0003-8942-4351;

Бессонова Валентина Петрівна (Дніпро) – доктор біологічних наук, професор, кафедра садово-паркового мистецтва та ландшафтного дизайну, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, orcid.org/0000-0002-4310-0971;

Бизова Марина Борисівна (Одеса) – кандидат наук державного управління, головна фахівчиня Департаменту екології та природних ресурсів Одеської обласної державної адміністрації, orcid.org/0009-0008-7042-848X;

Бобков Максим Олександрович (Житомир) – аспірант кафедри екології, Поліський Національний університет, orcid.org/0000-0007-7238-9122;

Богун Аліна Сергіївна (Дніпро) – студентка III курсу, Навчально-науковий інститут природокористування Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», orcid.org/0009-0008-0389-3234;

Божко Тетяна Василівна (Харків) – директор, Регіональний офіс водних ресурсів у Харківській області, orcid.org/0000-0002-9097-8832;

Бойко Валентин Михайлович (Київ) – аспірант кафедри екології, Державний університет «Київський авіаційний інститут», orcid.org/0009-0000-6638-1705;

Бойко Тарас Володимирович (Львів) – кандидат технічних наук, проректор університету з організації служби та підготовки, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, orcid.org/0000-0002-0882-2637;

Бондар Олександр Іванович (Київ, Україна) – професор, доктор біологічних наук, академік Національної академії аграрних наук, директор, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України», orcid.org/0000-0002-4488-2282;

Борецька Ірина Юріївна (Львів) – аспірантка кафедри екології, Львівський національний університет імені Івана Франка, orcid.org/0000-0002-6140-3191;

Броницький Вадим Олегович (Київ) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри геоінженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», orcid.org/0000-0002-3092-3418;

Бусленко Леся Володимирівна (Луцьк) – кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри зоології, Волинський національний університет імені Лесі Українки, orcid.org/0000-0002-4626-9019;

Бутенко Олександр Григорійович (Одеса), кандидат технічних наук, доцент кафедри екологічної безпеки та гідравліки, Національний університет «Одеська політехніка», orcid.org/0000-0001-6045-3106;

Ваньо Назар Олегович (Львів) – аспірант кафедри конструктивної географії і картографії, Львівський національний університет імені Івана Франка, orcid.org/0009-0004-4428-8525;

Васенко Олександр Георгійович (Харків) – кандидат біологічних наук, доцент, завідувачий лабораторією досліджень екологічної стійкості об'єктів довкілля та природних територій особливої охорони, Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем», orcid.org/0000-0002-8658-4144;

Васильєва Людмила Анатоліївна (Житомир) – кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри наук про Землю, Державний університет «Житомирська політехніка», orcid.org/0000-0003-0661-927X;

Васютинська Катерина Анатоліївна (Одеса) – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри екологічної безпеки та гідравліки Національний університет «Одеська політехніка», orcid.org/0000-0001-9800-1033

Вергеліс Вікторія Ігорівна (Вінниця) – асистент кафедри екології та охорони навколишнього середовища, Вінницький національний аграрний університет, orcid.org/0000-0003-1699-0064;

Вергельська Наталія Вікторівна (Київ) – доктор геологічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу гірничої геології, Державна установа «Науковий центр гірничої геології, геоєкології та розвитку інфраструктури Національної академії наук України», orcid.org/0000-0002-1440-6082;

Веселовський Дмитро Михайлович (Миколаїв) – аспірант кафедри екології, Чорноморський національний університет імені Петра Могили, orcid.org/0009-0002-3643-0611;

Вискушенко Дмитро Андрійович (Житомир) – кандидат біологічних наук, доцент кафедри екології, Поліський Національний університет, orcid.org/0000-0002-2747-9117;

Владимиров Руслан Валерійович (Харків) – аспірант кафедри фундаментальної та прикладної геології, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, orcid.org/0009-0009-5807-4962;

Власенко Олег Васильович (Київ) – науковий співробітник, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України», orcid.org/0000-0001-9802-0322;

Гаврилюк Максим Никандрович (Черкаси) – кандидат біологічних наук, доцент кафедри агрономії, біології та екології, Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, orcid.org/0000-0001-5729-8184;

Ган Олена Валеріївна (Київ) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри геоінженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», orcid.org/0000-0003-0739-9600;

Герасимчук Олена Леоніївна (Житомир) – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри наук про Землю, Державний університет «Житомирська політехніка», orcid.org/0000-0003-4242-0946;

Голік Юрій Степанович (Полтава) – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри теплогазопостачання, вентиляції та теплоенергетики, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», orcid.org/0000-0002-5429-6746;

Гончарук Віталій Володимирович (Умань) – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри хімії та екології, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини, orcid.org/0000-0002-3977-3612;

Гордій Наталія Михайлівна (Кам'янець-Подільський) – кандидат біологічних наук, доцент, старший викладач кафедри біології та екології, Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, orcid.org/0000-0002-5214-3770

Гребенюк Тетяна Володимирівна (Київ) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри геоінженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», orcid.org/0000-0002-9287-2919;

Григор'єва Людмила Іванівна (Миколаїв) – доктор біологічних наук, професор, завідувачка кафедри екології, Чорноморський національний університет імені Петра Могили, orcid.org/0000-0001-9452-2982;

Григорійчук Віталій Васильович (Чернівці) – асистент кафедри географії України та регіоналістики, Чернівецький національний університет імені Ю. Федьковича, orcid.org/0000-0002-8875-4354;

Григорчук Інна Дмитрівна (Кам'янець-Подільський) – кандидат біологічних наук, доцент кафедри біології та екології, Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, orcid.org/0000-0002-2260-998X;

Гузь Валерій Володимирович (Київ) – інженер, АТ «Укрнафта», orcid.org/0000-0002-6138-1471;

Гулай Віталій Володимирович (Кропивницький) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри екології, охорони навколишнього середовища та здорового способу життя, Центральноукраїнський національний технічний університет, orcid.org/0009-0009-5285-2102;

Д'яченко Наталія Олександрівна (Київ) – кандидат геологічних наук, старший науковий співробітник, Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України», orcid.org/0000-0002-4852-0203;

Даус Марія Євгенівна (Одеса) – кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри безпеки життєдіяльності, екології та хімії, Одеський національний морський університет, orcid.org/0000-0001-5298-795X;

Демчина Роман Олександрович (Львів) – кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри хімії, Національний лісотехнічний університет України, orcid.org/0009-0003-4561-6992;

Демчук Людмила Іванівна (Житомир) – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка», orcid.org/0000-0001-5698-7113;

Дичко Аліна Олегівна (Київ) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища екології та технологій захисту навколишнього середовища, Національний транспортний університет, orcid.org/0000-0003-4632-3203;

Дочинець Василь Васильович (Львів) – аспірант кафедри екологічної безпеки навчально-наукового інституту цивільного захисту, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, orcid.org/0009-0007-2119-7382;

Душечкіна Наталія Юріївна (Умань) – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри хімії та екології, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини, orcid.org/0000-0002-4203-7122;

Житова Олена Петрівна (Житомир) – доктор біологічних наук, професор, професор кафедри екології факультету лісового господарства та екології, Поліський національний університет, orcid.org/0000-0003-2572-4163;

Жицька Людмила Іванівна (Черкаси) – кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Черкаський державний технологічний університет, orcid.org/0000-0001-9055-1188;

Захарова Вікторія Ігорівна (Львів) – студент IV курсу географічного факультету, Львівський національний університет імені Івана Франка, orcid.org/0009-0009-5055-0813;

Зеленчук Іван Дмитрович (Умань) – аспірант кафедри екології та безпеки життєдіяльності, Уманський національний університет, orcid.org/0009-0008-8517-6617;

Іванченко Ольга Євгенівна (Дніпро) – кандидат біологічних наук, доцент, кафедра садово-паркового мистецтва та ландшафтного дизайну, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, orcid.org/0000-0002-8338-8543;

Івкіна Єлизавета Сергіївна (Херсон) – студентка V курсу факультету інформаційних технологій та дизайну, Херсонський національний технічний університет, orcid.org/0009-0007-7052-807X;

Ілюха Олександр Володимирович (Черкаси) – кандидат біологічних наук, ст. викладач кафедри агрономії, біології та екології, Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, orcid.org/0000-0002-4400-1158;

Іщенко Юлія Дмитрівна (Дніпро) – студентка II курсу, Навчально-науковий інститут природокористування Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», orcid.org/0009-0002-2000-0633;

Кагукіна Анастасія Максимівна (Житомир) – доктор філософії з екології, доцент, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка», orcid.org/0000-0001-8932-1211;

Казинян Андроник Варданович (Дніпро) – магістр садово-паркового господарства, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, orcid.org/0009-0006-4930-9721;

Карамушко Анжеліка Володимирівна (Одеса) – кандидат технічних наук, доцент кафедри екологічної безпеки та гідравліки, Національний університет «Одеська політехніка», orcid.org/0000-0002-5748-9746;

Касьяненко Дмитро Леонідович (Київ) – аспірант, ДНУ «Інститут екологічного відновлення та розвитку України», orcid.org/0009-0008-8344-1958;

Кірейцев Віталій Олександрович (Житомир) – аспірант кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка», orcid.org/0009-0005-9584-1244;

Кірейцева Ганна Вікторівна (Житомир) – доктор технічних наук, професор кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка», orcid.org/0000-0002-1055-1784;

Клід Віктор Васильович (Івано-Франківськ) – кандидат біологічних наук, завідувач кафедри лісового та аграрного менеджменту, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника, orcid.org/0009-0007-8310-433X;

Коваленко Юрій Леонідович (Харків) – доцент кафедри інженерної екології міст, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, orcid.org/0000-0002-2491-2309;

Ковка Наталія Сергіївна (Вінниця) – асистент кафедри екології та охорони навколишнього середовища, Вінницький національний аграрний університет, orcid.org/0000-0002-4556-2678;

Ковров Олександр Станіславович (Дніпро) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища, Навчально-науковий інститут природокористування, Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», orcid.org/0000-0003-0782-7767;

Ковтун Тетяна Ігорівна (Житомир) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри лісового та садово-паркового господарства, Поліський національний університет, orcid.org/0000-0003-1611-8030;

Колодій Валентина Анатоліївна (Кам'янець-Подільський) – кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри біології та екології, Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, orcid.org/0000-0002-9669-4144;

Комарницький Сергій Петрович (Кам'янець-Подільський) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортних технологій та засобів агропромислового комплексу, Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», orcid.org/0000-0002-7654-3373;

Коморна Оксана Михайлівна (Житомир) – доктор філософії PhD, доцент кафедри екології, Поліський Національний університет, orcid.org/0000-0003-1498-0719;

Коновалюк Світозар Юрійович (Житомир) – аспірант кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка», orcid.org/0009-0007-3872-3107;

Корнієнко Валентина Іванівна (Київ) – доктор біологічних наук, професор, директор Української лабораторії якості і безпеки продукції агропромислового комплексу, Національний університет біоресурсів і природокористування України, orcid.org/0000-0003-0403-7727;

Король Катерина Анатоліївна (Львів) – доктор філософії, науковий співробітник науково-дослідної лабораторії екологічної безпеки, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, orcid.org/0000-0003-4363-6933;

Кот Іван Тарасович (Київ) – студент II курсу, Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», orcid.org/0009-0007-5556-7353;

Кочубей Олена Василівна (Умань) – доктор філософії, викладач кафедри хімії та екології, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини, orcid.org/0000-0002-5047-6694;

Кривенко Галина Мирославівна (Івано-Франківськ) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технологій захисту навколишнього середовища та безпеки праці, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, orcid.org/0000-0001-5188-3032;

Крисінська Діана Олександрівна (Миколаїв) – кандидатка технічних наук, доцентка, доцентка кафедри екології, Чорноморський національний університет імені Петра Могили, orcid.org/0000-0002-3117-6039;

Крюковська Леся Іванівна (Київ) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища, Національний транспортний університет, orcid.org/0000-0001-8944-8036;

Кузнєцов Сергій Іванович (Херсон) – кандидат технічних наук, доцент кафедри хімічних технологій, експертизи та безпеки харчової продукції, Херсонський національний технічний університет, orcid.org/0000-0003-1766-931X;

Кулікова Дар'я Володимирівна (Дніпро) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища, Навчально-науковий інститут природокористування Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», orcid.org/0000-0003-0874-0188;

Кушнір Тарас Юрійович (Чернівці) – студент V курсу географічного факультету, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, orcid.org/0009-0001-5698-0242;

Лавріненко Катерина Валеріївна (Черкаси) – доктор філософії в галузі біології, викладач кафедри агрономії, біології та екології, Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, orcid.org/0000-0003-0549-5754;

Ломакіна Ольга Сергіївна (Харків) – старший викладач кафедри інженерної екології міст, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, orcid.org/0000-0003-3908-4638;

Луцюк Тарас Максимович (Кам'янець-Подільський) – аспірант кафедри біології та екології, Кам'янець-Подільський університет імені Івана Огієнка, orcid.org/0009-0009-8766-8057;

Магась Наталія Іванівна (Миколаїв) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, orcid.org/0000-0002-2579-1465;

Макарова Олена Валеріївна (Миколаїв) – старший викладач кафедри екології, Чорноморський національний університет імені Петра Могили, orcid.org/0000-0001-8560-5145;

Маковецька Олена Олексіївна (Одеса) – старший викладач кафедри хімії та екології, Одеська державна академія будівництва та архітектури, orcid.org/0009-0003-5537-5408;

Мандебура Святослав Васильович (Умань) – викладач кафедри хімії та екології, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини, orcid.org/0000-0001-7952-5974;

Мандрик Олег Миколайович (Івано-Франківськ) – доктор технічних наук, професор кафедри екології, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, orcid.org/0000-0002-2689-7165;

Масовець Богдан Петрович (Рівне) – аспірант кафедри природничих наук, Рівненський державний гуманітарний університет, orcid.org/0000-0002-1138-9758;

Матухно Олена Вікторівна (Дніпро / Берлін) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»; науковий співробітник департаменту моніторингу, звітності та верифікації викидів у торгівлі викидами, Німецьке екологічне агентство (Umweltbundesamt), orcid.org/0000-0001-5536-6745;

Машков Олег Альбертович (Київ, Україна) – доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України», orcid.org/0000-0001-9227-4647;

Мельник Сергій Володимирович (Одеса) – кандидат технічних наук, доцент кафедри екологічної безпеки та гідравліки. Національний університет «Одеська політехніка», orcid.org/0009-0002-5144-1212;

Мельник-Шамрай Вікторія Вікторівна (Житомир) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка», orcid.org/0000-0002-3551-5085;

Мідик Світлана Вікторівна (Київ) – кандидат ветеринарних наук, старший дослідник, доцент кафедри гігієни тварин та харчових продуктів імені професора А.К. Скороходька, Національний університет біоресурсів і природокористування України, orcid.org/0000-0002-2682-2884;

Мороз Віра Василівна (Тернопіль) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, директор Навчально-наукового центру сталого енергетичного розвитку та кліматичної безпеки, доцент кафедри агробіотехнологій, Навчально-науковий інститут інноватики, природокористування та інфраструктури Західноукраїнського національного університету, orcid.org/0000-0002-1457-4641;

Никитюк Юрій Андрійович (Житомир) – кандидат сільськогосподарських наук, Academic degree of Doctor of Philosophy, Ph. D., Agricultural Sciences (ecology), доктор економічних наук, професор кафедри екології, Поліський Національний університет, orcid.org/0000-0001-9142-7699;

Олійник Тетяна Петрівна (Одеса) – кандидат технічних наук, доцент кафедри хімії та екології, Одеська державна академія будівництва та архітектури, orcid.org/0000-0002-4469-6797;

Остапенко Владислав Володимирович (Миколаїв) – аспірант кафедри екології, Чорноморський національний університет імені Петра Могили, orcid.org/0009-0001-5649-1721;

Павлюк Маргарита Миколаївна (Луцьк) – слухачка секції метеорології та кліматології, Комунальна установа «Волинська обласна Мала академія наук», orcid.org/0009-0005-1813-8504;

Папач Володимир Володимирович (Черкаси) – генеральний директор Державної установи «Черкаський обласний центр контролю та профілактики хвороб Міністерства охорони здоров'я України», orcid.org/0009-0009-2128-8908;

Парахненко Владислав Геннадійович (Умань) – доктор філософії з наук про Землю, старший викладач кафедри екології та безпеки життєдіяльності, Уманський національний університет, orcid.org/0000-0002-4312-6194;

Пасічник Микола Дмитрович (Чернівці) – кандидат географічних наук, доцент кафедри географії України та регіоналістики, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, orcid.org/0000-0001-9378-6302;

Пацева Ірина Григорівна (Житомир) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка», orcid.org/0000-0001-6271-7355;

Петровська Мирослава Андріївна (Львів) – кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри конструктивної географії і картографії, Львівський національний університет імені Івана Франка, orcid.org/0000-0001-9427-7307;

Піциль Андрій Орестович (Житомир) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри екології, Поліський Національний університет, orcid.org/0000-0002-0962-574X;

Пічура Віталій Іванович (Херсон) – доктор сільськогосподарських наук, професор, завідувач кафедри екології та сталого розвитку імені професора Ю.В. Пилипенка, Херсонський державний аграрно-економічний університет, orcid.org/0000-0002-0358-1889;

Покшевницький Андрій Сергійович (Київ) – аспірант, Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України», orcid.org/0009-0003-3804-3495;

Полтавченко Тетяна Вікторівна (Рівне) – кандидат ветеринарних наук, доцент, завідувач кафедри водних біоресурсів, Національний університет водного господарства та природокористування, orcid.org/0000-0001-8531-2924;

Попович Наталія Пилипівна (Львів) – кандидат технічних наук, головний спеціаліст, Львівський окружний адміністративний суд, orcid.org/0000-0003-1044-1515;

Портухай Оксана Іванівна (Рівне) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри екології, географії та туризму, Рівненський державний гуманітарний університет, Громадська організація «Українське географічне товариство», orcid.org/0000-0002-9078-0658;

Потравка Лариса Олександрівна – доктор економічних наук, професор, професор кафедри екології та сталого розвитку імені професора Ю.В. Пилипенка, Херсонський державний аграрно-економічний університет, orcid.org/0000-0002-0011-2286;

Присяжний Володимир Ілліч (Кмів) – керівник Центру, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України», orcid.org/0000-0001-7825-9037;

Приходько Кирило Володимирович (Харків) – аспірант кафедри екології, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, orcid.org/0000-0002-7165-1834;

Радомська Маргарита Мирославівна (Київ) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології, Державна установа «Київський авіаційний інститут», orcid.org/0000-0002-8096-0313;

Романюк Ганна Володимирівна (Львів) – кандидат хімічних наук, доцент, молодший науковий співробітник відділення фізико-хімії горючих копалин, Інститут фізико-органічної хімії і вуглехімії імені Л.М. Литвиненка Національної академії наук України, orcid.org/0009-0006-5592-2629;

Романюк Ольга Іванівна (Львів) – кандидат хімічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділення фізико-хімії горючих копалин, Інститут фізико-органічної хімії і вуглехімії імені Л.М. Литвиненка Національної академії наук України, orcid.org/0000-0002-6249-2683;

Романюта Єлизавета Володимирівна (Одеса) – студентка II курсу магістратури, Архітектурно-художній інститут Одеської державної академії будівництва та архітектури, orcid.org/0009-0003-5539-449X;

Руденко Валерій Петрович (Чернівці) – доктор географічних наук, професор, завідувач кафедри економічної географії та екологічного менеджменту, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, orcid.org/0000-0002-7542-4399;

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, orcid.org/0009-0003-8072-2862;

Самар Ангеліна Володимирівна (Житомир) – асистент кафедри хімії, Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», orcid.org/0009-0002-4565-0595;

Семенко Лариса Олександрівна (Київ) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри агрохімії та якості продукції рослинництва імені О.І. Душечкіна, Національний університет біоресурсів і природокористування України, orcid.org/0000-0002-4586-3681;

Семенченко Оксана Олександрівна (Херсон) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімічних технологій, експертизи та безпеки харчової продукції, Херсонський національний технічний університет, orcid.org/0000-0002-1251-2711;

Сенін Сергій Андрійович (Київ) – кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник Української лабораторії якості і безпеки продукції агропромислового комплексу, Національний університет біоресурсів і природокористування України, orcid.org/0000-0001-7972-5714;

Серга Тетяна Миколаївна (Полтава) – аспірантка, асистент кафедри прикладної екології та хімії, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», orcid.org/0009-0006-6575-5529;

Сікора Володимир Іванович (Кам'янець-Подільський) – аспірант кафедри біології та екології, Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, orcid.org/0009-0008-2488-3705;

Совгіра Світлана Василівна (Умань) – доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри хімії та екології, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини, orcid.org/0000-0002-8742-7773;

Сонько Сергій Петрович (Умань) – доктор географічних наук, професор кафедри екології та безпеки життєдіяльності, Уманський національний університет, orcid.org/0000-0002-7080-9564;

Сорочинська Олена Леонідівна (Київ) – кандидат історичних наук, в. о. завідувача кафедри екології та безпеки життєдіяльності, Національний транспортний університет, orcid.org/0000-0003-2477-1275;

Спрягайло Оксана Анатоліївна (Черкаси) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри агрономії, біології та екології, Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, orcid.org/0000-0003-0065-5229;

Спрягайло Олександр Васильович (Черкаси) – кандидат біологічних наук, доцент кафедри агрономії, біології та екології, Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, orcid.org/0000-0002-9431-9746;

Степова Олена Валеріївна (Полтава) – доктор технічних наук, професор, Член-кореспондент Інженерної академії України, в.о. директора, Навчально-науковий інститут нафти і газу та енергетики Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», orcid.org/0000-0002-6346-5484;

Суходольська Ірина Леонідівна (Рівне) – кандидат біологічних наук, доцент кафедри природничих наук, Рівненський державний гуманітарний університет, orcid.org/0000-0001-7502-3061;

Теплюк Вадим Сергійович (Луцьк) – кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри зоології, факультет біології та лісового господарства Волинського національного університету імені Лесі Українки, orcid.org/0000-0002-0611-2797;

Тимченко Інна Вікторівна (Миколаїв) – кандидатка технічних наук, доцентка, доцентка кафедри садово-паркового господарства, Державний захід «Луганський національний університет імені Тараса Шевченка», orcid.org/0000-0002-1956-1065;

Тягній Людмила Михайлівна (Полтава) аспірант кафедри прикладної екології та хімії, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», orcid.org/0000-0002-4954-002X;

Улицький Олег Андрійович (Київ) – доктор геологічних наук, професор, Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України», orcid.org/0000-0003-2674-2208;

Федонюк Віталіна Володимирівна (Луцьк) – кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри екології, Луцький національний технічний університет, orcid.org/0000-0002-1880-6710;

Фірман Юрій Петрович (Кам'янець-Подільський) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортних технологій та засобів агропромислового комплексу, Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», orcid.org/0000-0001-5584-0216;

Франчук Михайло Володимирович (Сарни) – кандидат біологічних наук, заступник директора з наукової роботи, Рівненський природний заповідник, orcid.org/0000-0002-7044-7137;

Харченко Юлія Володимирівна (Суми) – кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри біології людини, хімії та методики навчання хімії, Сумський державний педагогічний університет імені А.С.Макаренка, orcid.org/0000-0002-8960-2440;

Хижняк Світлана Володимирівна (Київ) – доктор біологічних наук, професор, провідний науковий співробітник Української лабораторії якості і безпеки продукції агропромислового комплексу, Національний університет біоресурсів і природокористування України, orcid.org/0000-0001-6745-2894;

Хоменко Олена Михайлівна (Черкаси) – кандидат хімічних наук, доцент, завідувачка кафедри екології та природоохоронних технологій, Черкаський державний технологічний університет, orcid.org/0000-0001-9329-0577;

Циганенко-Дзюбенко Ілля Юрійович (Житомир) – доктор філософії зі спеціальності 101 «Екологія», в.о. завідувача кафедри сталої інфраструктури та гідроекології, Державний університет «Житомирська політехніка», orcid.org/0000-0002-3240-8719;

Частоколенко Ігор Павлович (Черкаси) – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри фізико-математичних дисциплін, Національний університет цивільного захисту України, orcid.org/0000-0001-9323-2684;

Черба Ольга Володимирівна (Харків) – науковий співробітник, Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем», orcid.org/0000-0001-8600-1319;

Шамрай Володимир Ігорович (Житомир) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри гірничих технологій та будівництва імені професора Бакка М.Т., Державний університет «Житомирська політехніка», orcid.org/0000-0001-9441-9379;

Шевчик Василь Леонович (Київ) – кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник, Навчально-науковий центр «Інститут біології та медицини» Київського національного університету імені Тараса Шевченка, orcid.org/0000-0001-5981-3776;

Шевчик-Костюк Леся Зеновіївна (Львів) – кандидат біологічних наук, науковий співробітник відділення фізико-хімії горючих копалин, Інститут фізико-органічної хімії і вуглехімії імені Л.М.Литвиненка Національної академії наук України, orcid.org/0000-0002-6394-8742;

Шевчук Лариса Миколаївна (Житомир) – доктор біологічних наук, професор, професор кафедри наук про Землю, Державний університет «Житомирська політехніка», orcid.org/0000-0003-4164-514X;

Шелудченко Леся Сергіївна (Кам'янець-Подільський) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри транспортних технологій та засобів агропромислового комплексу, Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», orcid.org/0000-0003-0409-4641;

Шелюк Юлія Святославівна (Житомир) – доктор біологічних наук, професор, професор кафедри ботаніки, біоресурсів та збереження біорізноманіття, Житомирський державний університет імені Івана Франка, orcid.org/0000-0001-6429-1028;

Шуплат Тарас Ігорович (Львів) – кандидат сільсько-господарських наук, старший викладач кафедри екологічної безпеки, Навчально-науковий інститут цивільного захисту Львівського державного університету безпеки життєдіяльності, orcid.org/0000-0003-3497-2636;

Яненко Владислав Сергійович (Київ) – аспірант кафедри загальної екології, радіобіології та безпеки життєдіяльності, Національний університет біоресурсів і природокористування України, orcid.org/0000-0003-1190-725X.

ЕКОЛОГІЧНІ НАУКИ

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

2(65)

- **Екологічне відновлення та розвиток України**
- **Екологічна безпека**
- **Екологія агровиробництва**
- **Екологія виробництва**
- **Екологія водних ресурсів**
- **Екологія земельних ресурсів**
- **Екологія і будівництво**
- **Екологія транспорту**
- **Екологія міста**
- **Екологія болотних систем**
- **Екологія біорізноманіття**
- **Екологія екосистем**
- **Екологічний моніторинг**
- **Екологічна безпека АЗС**
- **Моніторинг екологічних наслідків воєнних дій**
- **Зміна клімату**
- **Управління відходами**
- **Практика екологічного управління**
- **Теоретична екологія**

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 – 29.05.2026 р.

Дата друку – 30.05.2026 р. Формат 64x84/8.

Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman. Цифровий друк.

Ум. друк. арк. 47,90. Тираж 100. Замовлення № 0526/538.

Ціна договірна. Віддруковано з готового оригінал-макета