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

3(66)

Видавничий дім
«Гельветика»
2026

УДК 502+504

Друкується за рішенням Вченої Ради
Державної наукової установи
«Інститут екологічного відновлення та розвитку України»
(№ 3-26 від 08.05.2026)

Екологічні науки : науково-практичний журнал / Головний редактор Бондар О. І. – К. : Видавничий дім «Гельветика», 2026. – № 3(66). – 364 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
Бабичев 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 No 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 (E1 – Біологія та біохімія), природничих наук (E2 – Екологія, E4 – 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)

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

ЗМІСТ

ЕКОЛОГІЯ ЗЕМЕЛЬНИХ РЕСУРСІВ.....9

Бондар О.І., Кравчук В.І., Іваніна В.В., Квак В.М., Олійник Т.М. Потенціал міскантусу для фіторемедіації земель, забруднених унаслідок військових дій.....9

Дудар В.В. Алюміній як індикаторний маркер залишкового забруднення ґрунтів вибуховими речовинами.....16

Сікач Т.І., Колодій М.А., Алпатова О.М., Кравчук-Ободзінська Т.В., Булковська А.Г. Ресурсний потенціал мінеральної пульпи у відновленні родючості антропогенно змінених ґрунтів.....25

ЕКОЛОГІЯ ВОДНИХ РЕСУРСІВ.....32

Жукова О.Г., Старжинський П.С., Кордуба І.Б., Прокопенко І.О. Оцінка техноємності та екологічної стійкості Дніпра в умовах урбанізації (на прикладі м. Києва).....32

Латуша Д.Р., Максименко М.П., Шевченко В.О., Кватернюк С.М. Дистанційна оцінка трофічного стану р. Південний Буг з використанням фітопланктону та вищої водної рослинності як індикаторів азотного навантаження.....41

Мацюк С.А., Яковлєв В.В., Дмитренко Т.В. Покращення показників фізіологічної повноцінності артезіанських вод із використанням природних мінералів.....50

Шевченко Р.Ю. Науково-практичне обґрунтування ціноутворення рекреаційної одиниці послуг на водних об'єктах міста.....56

ЕКОЛОГІЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ.....63

Мельник-Шамрай В.В., Давидова І.В., Курбет Т.В., Дідківська Ю.А., Дем'янчук В.І., Марчук К.О. Ліхеноіндикаційна оцінка стану атмосферного повітря в умовах урбанізованого середовища.....63

ЕКОЛОГІЯ ЛІСОВИХ РЕСУРСІВ.....73

Гунько С.О., Сапа Є.Ю. Екологічна оцінка та оптимізація захисних лісосмуг уздовж автомобільної траси Н08 (с. Братське).....73

Питуляк М.Р., Питуляк М.В., Гунько С.І., Питуляк М.М. Екологічні аспекти збереження та відновлення лісових ресурсів Подільського регіону.....80

Руденко С.В., Руденко В.П. Лісовий потенціал як визначальний вид природних ресурсів в екосистемах України.....85

ЕКОЛОГІЯ ПРИРОДНИХ ЕКОСИСТЕМ.....90

Волошин В.С., Кленін О.В. Хронометрична асиметрія як фундаментальне обмеження взаємодії у екологічних системах.....90

Іляшевич М.М. Екологічна оцінка фітомеліоративної ефективності територій порушеними пожежами в природних екосистемах.....99

Михалюк І.М., Гурська О.В., Галаган О.К. Оцінка ступеня порушення екосистеми за зовнішніми ознаками деревних рослин (на прикладі Львівської області).....107

Суходольська І.Л. Використання індикаторних характеристик фітопланктону при оцінюванні екологічного стану екосистеми.....113

ЕКОЛОГІЯ ПРИРОДНО-ЗАПОВІДНИХ ТЕРИТОРІЙ.....119

Бакуліч О.О., Кухтик Н.О., Крюковська Л.І., Кобзиста О.П. Оцінка функціонування та збереження природно-заповідного фонду України в умовах воєнного стану.....119

Кудряшова К.М., Олішевська Ю.А. Вплив кліматичних змін на функціонування екосистем природно-заповідних територій.....126

ЗБЕРЕЖЕННЯ БІОЛОГІЧНОГО ТА ЛАНДШАФТНОГО РІЗНОМАНІТТЯ.....135

Любинський О.І., Пучка О.В., Жмурко М.О., Якубаш Р.А. Екосистемні підходи до збереження рослинного біорізноманіття в мережі природно-заповідного фонду України.....135

Шарамок Т.С., Дорошенко А.В. Сучасна біолого-екологічна характеристика судака (*Sander lucioperca* Linnaeus, 1758) Кам'янського водосховища.....144

ЕКОЛОГІЯ АГРОВИРОБНИЦТВА.....150

Боброва М.С., Дефорж Г.В., Мирза-Сіденко В.М., Найдьонова Г.Г., Ларичева О.М., Цвях О.О. Еколого-біохімічна стійкість насіннєвого матеріалу як фактор формування якості агропродукції та підтримки здоров'я людини.....150

Кравець М.Я., Грицак Л.Р. Вплив агротехніки на фотосинтетичний потенціал сортів *Citrullus lanatus* (thunb.) Matsum. & Nakai.....157

ЕКОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА.....166

Багрій С.М., Новосільський М.В. Екологічні проблеми та результати їх дослідження на відпрацьованих соляних родовищах Карпатського регіону.....166

Belokon K.V. Development of catalytic materials based on nanostructured intermetallics for solving environmental problems of the coke-chemical industry.....171

Пакуляк А.Ю., Григорчук І.Д. Флора та рослинність кар'єрів: аналіз і узагальнення наукових досліджень.....178

ЕКОЛОГІЯ БУДІВНИЦТВА.....183

Зеленчук І.Д., Сонько С.П. Геоморфологічні засади оцінки придатності територій до забудови.....183

ЕКОЛОГІЯ МІСТА.....190

Дунаєвська О.Ф., Борисюк Б.В., Сокульський І.М., Світельський М.М., Ковальчук О.М. Дослідження активності калію-40 в грунті ботанічного саду, паркових та урбаландшафтах міста Житомира.....190

Суслова О.П. Аналіз гігроморфної структури дендроценозів промислових міст у контексті сучасних змін гідротермічного режиму степової зони України.....195

ЕКОЛОГІЯ АНТРОПОГЕННО ТРАНСФОРМОВАНОГО СЕРЕДОВИЩА.....202

Соболенко Л.Ю., Мороз Л.М., Сорокіна С.В. Адаптації живих організмів до антропогенно трансформованого середовища: морфофункціональні, поведінкові та еволюційні аспекти на прикладі одуда (*Upupa epops* L.).....202

ЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ ВОЄННИХ ДІЙ.....208

Zhmud V., Kot I.T., Hrebeniuk T.V., Bronytskyi V.O. Humanitarian demining of the Black Sea under environmental challenges, technological solutions and state permit regulation.....208

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА.....212

Bilokon A.O., Aleksieieva A.O. Industrial energy transformation and multi-level governance: evidence from Germany.....212

Демчук Л.І., Алпатова О.М., Скиба Г.В., Русецька Н.М. Оцінка накопичувального екологічного ризику в зонах високої інтенсивності руху транспорту.....227

Кричевська Д.А., Петровська М.А. Екологічно безпечні технології: етимологія поняття та підходи до класифікації.....232

Машиністов В.Е., Балакін В.Ф., Рак П.В., Соловйова І.А., Николаєнко Ю.М. Гамма-випромінювання у виявленні вибухонебезпечних речовин.....239

Подзерей Р.В. Урбоекологічні трансформації природних ресурсів Кіровоградської області.....244

Стасевич С.П., Махняк А.Я. Порівняльний аналіз досліджень та розробок у пошуку доступних технологій виготовлення фільтрувальних матеріалів для очищення повітря.....249

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

ЕКОЛОГІЧНИЙ МЕНЕДЖМЕНТ.....257

Любінська Л.Г., Григорчук І.Д. Біоіндикаційні властивості *Buxus sempervirens* L. в системі екологічного менеджменту урболандшафтів.....257

Тарасюк М.В. Сценарне моделювання стану територій природно-заповідного фонду як інструмент екологічного управління.....262

ТЕОРЕТИЧНА ЕКОЛОГІЯ.....267

Горго Ю.П. Вплив низькочастотних флуктуацій атмосферного тиску на вегетативні характеристики людини.....267

Карпенко Ю.О., Свердлов В.О. Природоохоронні території та елементи охоронюваних ландшафтів у системі підготовки та реалізації підходів стратегічної екологічної оцінки документів планування територіальних громад.....274

Лукіна Є.В., Волошина Н.О. Порівняльний аналіз практик верифікація викидів парникових газів та перспективи гармонізації.....281

Piddubna A.M., Pankova S.O., Matusiak M.V. Scientific and practical aspects of the reconstruction of green plantings in the "Podillia" Botanical Garden of Vinnytsia National Agrarian University.....285

Спрягайло О.А., Спрягайло О.В., Лавріненко К.В. Інтеграція екологічної складової у стратегії розвитку територіальних громад: основні тенденції та виклики.....289

Юрченко Т.В., Пикало С.В., Пірич А.В., Олефіренко Б.А. Спосіб добору посухостійкого селекційного матеріалу пшениці ярої.....296

УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ.....300

Дригулич С.П., Орфанова М.М., Дригулич П.Г. Вплив рідких відходів буріння на довкілля.....300

Криштоп Є.А. Циркулярне управління відходами: методологія інтеграції біоенергетики та технологій рекуперації.....311

Черняк Л.М., Манєцкі Томаш, Чешельскі Радослав, Дмитруха Т.І., Мельниченко В.В., Олександр Штика, Фролов В.Ф. Оцінка ефективності використання відходів біоенергетичних виробництв для відновлення ґрунтів, забруднених дизельним паливом.....318

ЗМІНА КЛІМАТУ.....324

Коваленко Ю.Л., Полив'янчук А.П. Прогнозування нормованого показника градусо-діб опалювального періоду на основі аналізу дінаміки зміни клімату в Україні.....324

Панчук О.І., Тригуба О.В., Погорєлова О. М. Вразливість людини до теплового стресу в умовах кліматичних змін: фізіологічні межі та індивідуальні ризики.....331

Патрушева Л.І. Багаторічна динаміка кліматичних показників та її вплив на раритетну фітобіоту Миколаївської області.....338

ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ.....347

Gorobei M.S. Earth observation for assessing environmental impacts of war in Ukraine: transboundary risks and monitoring approaches.....347

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ.....356

CONTENTS

ECOLOGY OF LAND RESOURCES.....9

Bondar O., Kravchuk V., Ivanina V., Kvak V., Oliynyk T. The potential of miscanthus for phytoremediation of lands contaminated by military operations 9

Dudar V. Aluminum As An Indicator Marker Of Residual Soil Contamination By Explosives 16

Sikach T., Kolodii M., Alpatova O., Kravchuk-Obodzinska T., Bulkovska A. Resource Potential of Mineral Pulp in Restoring Fertility of Anthropogenically Altered Soils.....25

ECOLOGY OF WATER RESOURCES.....32

Zhukova O., Starzhynskyi P., Korduba I., Prokopenko I. Assessment of the techno-capacity and ecological resilience of the dnipro river under urbanisation (the case of Kyiv) 32

Latusha D., Maksymenko M., Shevchenko V., Kvaterniuk S. Remote assessment of the trophic state of the Southern Bug River using phytoplankton and higher aquatic vegetation as indicators of nitrogen load.....41

Matsiuk S., Yakovlev V., Dmytrenko T. Improvement of artesian waters physiological adequacy indices using natural minerals.....50

Shevchenko R. Scientific and practical substantiation of pricing for recreational service units at water bodies in urban areas.....56

ECOLOGY OF ATMOSPHERIC AIR.....63

Melnyk-Shamrai V., Davydova I., Kurbet T., Didkivska Y., Demianchuk V., Marchuk K. Lichenoindication assessment of atmospheric air condition in an urbanized environment.....63

ECOLOGY OF FOREST RESOURCES.....73

Hunko S., Sapa E. Ecological Assessment and Optimization of Roadside Shelterbelts Along the N08 Highway (Bratske Village).....73

Pytuliak M., Pytuliak M., Hunko S., Pytuliak M. Ecological Aspects of Conservation and Restoration of Forest Resources in the Podillia Region.....80

Rudenko S., Rudenko V. Forest Potential as a Determinant Type of Natural Resources in the Ecosystems of Ukraine.....85

ECOLOGY OF NATURAL ECOSYSTEMS.....90

Voloshyn V., Klenin O. Chronometric Asymmetry as a Fundamental Constraint on Interaction in Ecological Systems.....90

Ilyashevych M. Ecological assessment of phytomelioration efficiency of territories disturbed by fires in natural ecosystems 99

Mykhalyuk I., Gurska O., Galagan O. Assessment of the degree of ecosystem disruption based on external characteristics of woody plants (on the example of the Lviv region).....107

Sukhodolska I. The use of phytoplankton indicator characteristics in assessing the ecological status of an ecosystem.....113

ECOLOGY OF NATURE RESERVES.....119

Bakulich O., Kukhtyk N., Kriukovska L., Kobzysta O. Assessment of functioning and conservation of the nature reserve fund of Ukraine under martial law.....119

Kudriashova K., Olishevska Yu. Impact of climate change on the functioning of ecosystems of nature reserved areas.....126

PRESERVATION OF BIOLOGICAL AND LANDSCAPE DIVERSITY.....135

Liubynskyi O., Puchka O., Zhmurko M., Yakubash R. Ecosystem approaches to the conservation of plant biodiversity in the network of the nature reserve fund of Ukraine.....135

Sharamok T., Doroshenko A. Modern biological and ecological characteristics of zander (*Sander lucioperca* Linnaeus, 1758) of the Kamianske Reservoir.....144

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

ECOLOGY OF AGRICULTURAL PRODUCTION.....150

Bobrova M., Deforzh H., Myrza-Sidenko V., Naidonova H., Larycheva O., Tsviakh O. Eco-biochemical stability of seed material as a factor in shaping agricultural product quality and supporting human health.....150

Kravets M., Hrytsak L. The effect of agronomic practices on the photosynthetic potential of *Citrullus lanatus* (thunb.) Matsum. & nakai varieties.....157

ECOLOGY OF PRODUCTION.....166

Bagriy S., Novosilskyi M. Environmental problems and results of their research at worked salt deposits in the Carpathian region.....166

Belokon K.V. Development of catalytic materials based on nanostructured intermetallics for solving environmental problems of the coke-chemical industry.....171

Pakulyak A., Hryhorchuk I. Flora and vegetation of quarries: analysis and synthesis of scientific research.....178

CONSTRUCTION ECOLOGY.....183

Zelenchuk I., Sonko S. Geomorphological principles of land suitability assessment for construction.....183

ECOLOGY OF THE CITY.....190

Dunaievska O., Borysiuk B., Sokulsky I., Svitelskyi M., Kovalchuk O. Study of activity of potassium-40 in the soil of the botanical garden, parks and urban landscapes of the city of Zhytomyr.....190

Suslova O. Analysis of the hygromorphic structure of dendrocenoses in industrial cities in the context of modern changes of the hydrothermal regime of the Steppe zone of Ukraine.....195

ECOLOGY OF ANTHROPOGENICALLY TRANSFORMED ENVIRONMENT.....202

Sobolenko L., Moroz L., Sorokina S. Adaptations of living organisms to anthropogenically transformed environments: morphofunctional, behavioral, and evolutionary aspects (on the example of the hoopoe, *Upupa epops L.*).....202

ENVIRONMENTAL CONSEQUENCES OF MILITARY OPERATIONS.....208

Zhmud V., Kot I.T., Hrebeniuk T.V., Bronytskyi V.O. Humanitarian demining of the Black Sea under environmental challenges, technological solutions and state permit regulation.....208

ENVIRONMENTAL SAFETY.....212

Bilokon A.O., Aleksieieva A.O. Industrial energy transformation and multi-level governance: evidence from Germany.....212

Demchuk L., Alpatova O., Skyba O., Rusetska N. Assessment of cumulative environmental risk in areas with high traffic intensity.....227

Krychevska D., Petrovska M. Environmentally safe technologies: etymology of the term and approaches to classification.....232

Mashinistov V., Balakin V., Rak P., Solovyova I., Nikolayenko Yu. Gamma radiation in the detection of explosive substances.....239

Podzerei R. Urboecological transformations of natural resources in the Kirovohrad region.....244

Stasevych S., Makhniak A. Comparative analysis of research and development in search of available technologies for manufacturing filtering materials for air purification.....249

ENVIRONMENTAL MANAGEMENT.....257

Lyubinska L., Hryhorchuk I. Bioindicator Properties of *Buxus sempervirens* L. in the System of Environmental Management of Urban Landscapes.....257

Tarasiuk M. Scenario modelling of nature reserve fund territories as an environmental management tool.....262

THEORETICAL ECOLOGY 267

Gorgo Yu. The effect of low-frequency fluctuations in atmospheric pressure on human vegetative characteristics 267

Karpenko Yu., Sverdlov V. Nature conservation areas and elements of protected landscapes in the system of preparation and implementation of approaches to strategic environmental assessment of planning documents of territorial communities 274

Lukina Y., Voloshyna N. A comparative analysis greenhouse gas emissions verification and harmonisation prospects 281

Piddubna A.M., Pankova S.O., Matusiak M.V. Scientific and practical aspects of the reconstruction of green plantings in the "Podillia" Botanical Garden of Vinnytsia National Agrarian University 285

Spriahailo O., Spriahayilo O., Lavrinenko K. Integration of the environmental component into territorial community development strategies: key trends and challenges 289

Yurchenko T., Pykalo S., Pirych A., Olefirenko B. Method for selecting drought-resistant breeding material of spring wheat 296

WASTE MANAGEMENT 300

Dryhulych S., Orfanova M., Dryhulych P. Environmental aspects of waste management during the construction of oil and gas wells 300

Kryshtop Ye. Circular Waste Management: Methodology for Integrating Bioenergy and Resource Recovery Technologies 311

Cherniak L., Maniecki T., Ciesielski R., Dmytrukha T., Melnychenko V., Shtyka O., Frolov V. Assessment of the efficiency of using bioenergy production waste for the remediation of diesel-contaminated soils 318

CLIMATE CHANGE 324

Kovalenko Yu., Polyvianchuk A. Prognostication the Heating Degree Days normalized indicator based on the analysis of climate change dynamics in Ukraine 324

Panchuk O., Tryhuba O., Pohorielova O. Human vulnerability to heat stress under climate change: physiological limits and individual risks 331

Patrusheva L. Long-term dynamics of climatic indicators and its impact on the rare phytobiota of the Mykolaiv region 338

ENVIRONMENTAL MONITORING 347

Gorobei M.S. Earth observation for assessing environmental impacts of war in Ukraine: transboundary risks and monitoring approaches 347

AUTHORS' CREDENTIALS 356

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

ЕКОЛОГІЯ ЗЕМЕЛЬНИХ РЕСУРСІВ

УДК 631.4(477):[338.14:338.246.8](043.2)
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.1

ПОТЕНЦІАЛ МІСКАНТУСУ ДЛЯ ФІТОРЕМЕДІАЦІЇ ЗЕМЕЛЬ, ЗАБРУДНЕНИХ УНАСЛІДОК ВІЙСЬКОВИХ ДІЙ

Бондар О.І.[1], **Кравчук В.І.**[2], **Іваніна В.В.**[2], **Квак В.М.**[2], **Олійник Т.М.**[3]
[1]Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, 03035, Київ
[2]Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків Національної академії аграрних наук України
вул. Клінічна, 25, 03110, м. Київ
[3]Інститут картоплярства Національної академії аграрних наук України
вул. Ярослава Мудрого, 22, 07853, смт. Немішаєве
v_ivanina@ukr.net

Досліджено рівень забруднення дерново-підзолистого ґрунту важкими металами кадмієм (Cd), свинцем (Pb), міддю (Cu) та цинком (Zn) після вибуху ракети типу Х-22/Х-32 та означено потенціал міскантусу (Miscanthus × giganteus) для фіторемедіації забруднених земель. Упродовж 2023-2024 років міскантус вирощували у зоні інтенсивного термічного впливу (зона вигорання) в межах 1–5 м від краю воронки вибуху та контрольних ділянках, розташованих на відстані 50 м від його епіцентру. Дослідження здійснювали у трикратній повторності. Розмір дослідної ділянки – 2,8 × 5 м, облікова площа – 14 м². Ділянки розміщували з орієнтацією на північ, південь і схід від епіцентру вибуху. Отримані експериментальні дані дозволили встановити рівень забруднення ґрунту, обсяги біомаси міскантусу за період досліджень, накопичення, перерозподіл і винос важких металів біомасою та ступінь очищення (фіторемедіації) ґрунту. Встановлено, що у зоні вигорання концентрація кадмію перевищила контроль у 7,9 раза, свинцю – у 32,5 раза, міді – у 12,8 раза, цинку – у 24,7 раза. Міскантус гігантський, висаджений на забрудненій ділянці, формував біомасу коренів у 2023 році – 1,12 кг/м², у 2024 році – 3,86 кг/м², що становило – відповідно 68% та 78% від загальної біомаси рослин. Біомаса коренів міскантусу у 2024 році була у 4,0 рази більшою, ніж у 2023 році. Порівняльний аналіз показав, що міскантус інтенсивніше накопичував важкі метали кореневою системою, ніж наземною біомасою. На другий рік вегетації винос важких металів кореневою системою із ґрунту був у 3,8–4,3 раза вищий, ніж у перший рік. За дворічного циклу вирощування міскантусу вміст кадмію у ґрунті зменшився порівняно з висхідним забрудненням на 10,6%, свинцю – на 7,7%, міді – на 11,8%, цинку – на 13,0%. Отримані результати мають науково-практичне значення, є основою для обґрунтування перспектив вирощування міскантусу на землях, пошкоджених військовими діями, з метою їх фіторемедіації. Такі дані можуть використовуватися для формування прогностичних моделей з фіторемедіації ґрунтів з урахуванням кліматичних та ґрунтових умов. *Ключові слова:* важкі метали, ґрунт, забруднення, міскантус, фіторемедіація, військові дії.

The potential of miscanthus for phytoremediation of lands contaminated by military operations. Bondar O., Kravchuk V., Ivanina V., Kvak V., Oliynyk T.

The article provides an assessment of the level of contamination of sod-podzolic soil with heavy metals cadmium (Cd), lead (Pb), copper (Cu) and zinc (Zn) after the explosion of a Kh-22/Kh-32 rocket and determines the potential of miscanthus (Miscanthus × giganteus) for phytoremediation of contaminated lands. During 2023-2024, miscanthus was grown in the zone of intense thermal impact (burnout zone) within 1–5 m from the edge of the explosion crater and in control plots located at a distance of 50 m from its epicenter. The experiment was set up in three replications. The size of the experimental plot was 2.8 × 5 m, the accounting area was 14 m². The plots were located with an orientation to the north, south and east of the explosion epicenter. The obtained experimental data allowed us to establish the level of soil contamination, the volume of Miscanthus biomass during the research years, the accumulation, redistribution and removal of heavy metals by biomass, and the degree of soil purification (phytoremediation). It was found that in the burnout zone, the concentration of cadmium exceeded the control by 7.9 times, lead by 32.5 times, copper by 12.8 times, and zinc by 24.7 times. Miscanthus giant, planted on a contaminated site, formed a root biomass of 1.12 kg/m² in 2023 and 3.86 kg/m² in 2024, which was 68% and 78% of the total plant biomass, respectively. The biomass of Miscanthus roots in 2024 was 4.0 times greater than in 2023. Comparative analysis showed that Miscanthus accumulated heavy metals more intensively through its root system than through its aboveground biomass. In the second year of vegetation, the removal of heavy metals from the soil by the root system was 3.8–4.3 times higher than in the first year. During the two-year cycle of growing miscanthus, the content of cadmium in the soil decreased by 10.6% compared to upstream pollution, lead by 7.7%, copper by 11.8%, and zinc by 13.0%. The results obtained have scientific and practical significance, are the basis for substantiating the prospects of growing miscanthus on lands damaged by military operations for the purpose of their phytoremediation. These data can be used to form predictive models for soil phytoremediation, taking into account climatic and soil conditions. *Key words:* heavy metals, soil, pollution, miscanthus, phytoremediation, military operations.

© Бондар О.І., Кравчук В.І., Іваніна В.В., Квак В.М., Олійник Т.М., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. Унаслідок військової агресії росії значні площі території України зазнали масштабних техногенних порушень та забруднення. За оцінками аналітичних центрів, станом на 2026 рік, близько 20% території України знаходиться під окупацією та зазнало прямого впливу бойових дій [1]. Вибухи артилерійських снарядів, ракет, авіаційних бомб та інших боєприпасів спричинили механічне руйнування ґрунтового покриву та його забруднення важкими металами і токсичними органічними сполуками [2].

Особливо інтенсивне забруднення ґрунтів спостерігається у так званій зоні вигорання, що формується безпосередньо навколо епіцентру вибуху. За результатами попередніх досліджень, у межах 1–5 м від краю воронки вибуху зосереджується 30–70% усіх токсичних елементів, що потрапляють у ґрунт під час детонації боєприпасів [3]. На відстані 5–20 м рівень забруднення значно зменшується, а за межами 20 м часто відповідає природному фоновому рівню [4].

Відновлення та введення до структури аграрного виробництва пошкоджених вибухами земель потребує їх очищення від важких металів та органічних полютантів. Найпоширенішими забруднювачами, які входять до складу боєприпасів є важкі метали кадмій (Cd), свинець (Pb), мідь (Cu) та цинк (Zn) [5]. Вирощування багаторічних біоенергетичних культур на забруднених землях може бути ефективним способом їх очищення. Інтенсивність акумуляції важких металів у рослинній біомасі залежить від фізіологічних особливостей рослин, їх здатності засвоювати хімічні елементи із ґрунту, а також комплексу ґрунтових чинників, зокрема, текстури, реакції ґрунтового розчину, вмісту органічної речовини [6]. В останні роки для відновлення родючості ґрунтів широко вирощують міскантус, який має потужну кореневу систему з високою поглинальною здатністю та здатен швидко формувати наземну біологічну масу. Незважаючи на певні наукові напрацювання, досліджень щодо вирощування міскантусу з метою фіторемедіації забруднених військовими діями земель є недостатньо. Мало вивченими є питання виносу та перерозподілу важких металів у біомасі, фіторемедіаційної здатності міскантусу залежно від ґрунтово-кліматичних умов та зони вирощування. Отже, необхідні дослідження та системний аналіз щодо перспективності вирощування міскантусу з метою фіторемедіації забруднених земель.

Актуальність дослідження. Пошук швидкого і ефективного способу очищення ґрунтів від важких металів є одним із пріоритетних напрямів досліджень у період військових дій та їх завершення. Аграрний сектор економіки є донором бюджету України і швидке повернення земель ріллі, які зазнали пошкоджень і забруднення внаслідок військових дій до системи аграрного виробництва сприятиме швидшому відновленню та розвитку держави у післявоєнний період.

Вирощування міскантусу з метою фіторемедіації ґрунтів має багатоцільове значення. Міскантус формує потужну кореневу систему, швидко поглинає із ґрунту важкі метали, наземна біомаса міскантусу має високу енергоємність і широко використовується на цілі біоенергетики. Багатофункціональність вирощування міскантусу посилює актуальність досліджень, підвищує практичну їх значимість, а отримані наукові дані є основою для розробки системи багатоцільового і ефективного очищення ґрунтів від важких металів.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Більшість наукових публікацій зазначають, що ефективність фіторемедіації ґрунтів залежить від поєднання багатьох чинників, серед яких важливу роль відіграє рослина, її здатність засвоювати хімічні елементи із ґрунту, швидко формувати біомасу та бути адаптованою до умов навколишнього середовища – ґрунту та погодних умов [6, 7]. Фіторемедіація завжди має бути прив'язана до конкретних ґрунтово-кліматичних умов вирощування. У цьому дослідженні акцент зроблено на оцінці ефективності вирощування міскантусу для фіторемедіації дерново-підзолистого ґрунту зони Полісся. Дослідження виконано у форматі дворічних спостережень (2023–2024 рр.), що забезпечило можливість оцінити щорічну акумуляцію важких металів у рослинах та специфіку їх розподілу у складових біомаси міскантусу. Ці дані є важливим науковим надбанням у контексті розвитку агроекології, моніторингу та ефективного очищення ґрунтів, а також можуть бути використані при обґрунтуванні ефективності вирощування міскантусу для потреб біоенергетики на пошкоджених військовими діями землях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Чисельні наукові публікації зазначають, що надходження важких металів у біомасу рослин залежить від ланцюга ґрунт–рослина–навколишнє середовище, де підбір високопродуктивних рослин істотно впливає та посилює процес їх поглинання [8]. Серед культур, які мають високу здатність до накопичення важких відмічають ріпак (Brassica napus), арундо тростинний (Arundo donax) та світчграс (Panicum virgatum) [9–11]. Останніми роками значну увагу дослідників привертає міскантус (Miscanthus × giganteus) – багаторічна біоенергетична культура з високою продуктивністю біомаси та добре розвиненою кореневою системою. Ці властивості забезпечують його здатність ефективно акумулювати та стабілізувати важкі метали у ґрунті [12–15]. Окремі публікації відмічають, що накопичення та перерозподіл важких металів в рослинах міскантусу має видову специфічність, залежить від ґрунтово-кліматичних умов вирощування і потребує проведення польових досліджень [6]. Ключовими властивостями ґрунтів, які впливають на рухомість хімічних елементів у ґрунті та інтенсивність їх поглинання рослинами є реак-

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

ція ґрунтового розчину, текстура, вміст органічної речовини. Зазначені фізико-хімічні характеристики визначають сорбційну здатність ґрунтів та впливають на інтенсивність надходження важких металів до біомаси рослин [16].

Отже, попри наявну наукову інформацію щодо перспективності вирощування міскантусу для фіторемедіації ґрунтів, недостатньо вивченим є комплекс питань пов'язаних з видовою специфічністю рослин міскантусу, специфікою ґрунтового покриву та особливостями умов вирощування.

Невирішені частини загальної проблеми. Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених міскантусу, невирішеним залишаються питання щодо ефективності його вирощування для фіторемедіації ґрунтів зони Полісся. Недостатньо даних щодо накопичення міскантусом важких металів за вирощування на легких дерново-підзолистих ґрунтах, щодо їх перерозподілу у складових біомаси та інтенсивності очищення ґрунтів даного типу від полютантів. Саме ці питання висвітлено у поданій статті.

Новизна. У межах дослідження (2023–2024 рр.) вперше проведено оцінку рівня забруднення дерново-підзолистого ґрунту важкими металами кадмієм (Cd), свинцем (Pb), міддю (Cu) та цинком (Zn) після вибуху ракети типу Х-22/Х-32 та визначено ефективність вирощування міскантусу (Miscanthus × giganteus) для фіторемедіації таких земель. Важливим аспектом є встановлення обсягів формування біомаси міскантусом по роках дослідження, накопичення та перерозподілу важких металів у складових біомаси, визначення ступеня очищення ґрунту від важких металів за дворічний цикл вирощування.

Методологічне або загальнонаукове значення. Дослідження проводили на земельній ділянці с. Буда-Бабенецька, що знаходиться між м. Буча і м. Бородянка. Земельна ділянка була пошкоджена вибухом ракети Х-22/Х-32, глибина воронки – 6 м, радіус – 14 м, зона вигорання – 5 м від краю воронки. Схема досліду включала два варіанти: 1 – ділянка розміщена на віддалі 50 м від епіцентру вибуху (контроль), 2 – забруднена ділянка розміщена у 1-5 м від границі воронки (зона вигорання).

Дослід закладено у трикратній повторності. Розмір дослідної ділянки –2,8х5 м, облікова площа – 14 м^2. У зоні вигорання ділянки розміщували з орієнтацією на північ, південь та схід від епіцентру вибуху на віддалі 1-5 м від границі воронки. Контроль розміщували на віддалі 50 м з аналогічною орієнтацією та розміром ділянок.

На дослідних ділянках висаджували Міскантус гіганський сорт «Прометей». Перед висаджуванням рослин з орного 0-20 см шару відбирали зразки ґрунту у кожному повторенні та формували змішаний зразок. У змішаному зразку визначали кадмій (Cd), свинець (Pb), мідь (Cu) і цинк (Zn) на атомно абсорбційному спектрометрі. Осінню, по завершенню вегетації, проводили збір урожаю з усієї ділянки. У кожному повторенні відбирали зразки рослин для визначення вмісту важких металів та сухої речовини.

Ґрунт дослідної ділянки – дерново-підзолистий піщаний. В орному 0-20 см шарі вміст гумусу за Тюріним – 1,03%, рухомого фосфору і калію за Кірсановим – 128 та 142 мг/кг ґрунту, відповідно, pH сольове – 4,9.

Експериментальні дані опрацьовували методом дисперсійного аналізу за допомогою комп'ютерної програми Statistica, 2013.

Дане дослідження поглиблює розуміння закономірностей обігу важких металів у ланцюгу «ґрунт-рослина» та їх накопичення рослинами міскантусу за дворічного циклу вирощування на дерново-підзолистому ґрунті зони Полісся. У загальнонауковому аспекті ці результати важливі для агроекології, ґрунтознавства, екологічної безпеки, оскільки забезпечують науково обґрунтоване планування насаджень міскантусу для фіторемедіації земель пошкоджених військовими діями.

Виклад основного матеріалу. Агрохімічний аналіз орного 0–20-см шару дерново-підзолистого ґрунту засвідчив значний рівень забруднення важкими металами у зоні вигорання (1–5 м від границі воронки вибуху). Найвищі концентрації встановлено для цинку та міді, тоді як кадмій і свинець накопичувалися у дещо менших кількостях. За рівнем накопичення метали розміщувалися у такій послідовності Zn > Cu > Pb > Cd (табл. 1).

У 2023 році вміст кадмію у ґрунті забрудненої ділянки перевищував контроль у 7,9 раза, свинцю – у 32,5 раза, міді – у 12,8 раза, а цинку – у 24,7 раза.

У 2024 році концентрація важких металів на контрольній ділянці залишалася майже незмінною порівняно з попереднім роком. Водночас на забрудненій території спостерігалося поступове зниження їхнього вмісту в ґрунті. Зокрема, концентрація кадмію порівняно з висхідним показником зменшилася на 10,6%, свинцю – на 7,7%, міді – на 11,8%, цинку – на 13,0%.

Вирощування міскантусу гігантського на дослідних ділянках супроводжувалося інтенсивним наростанням біомаси. Урожайність рослин у перший рік вегетації становила 1,451–1,436 кг/м^2, а у другий рік – 5,739–5,675 кг/м^2. При цьому рівень продуктивності рослин на забруднених ділянках практично не відрізнявся від контрольних варіантів, що відповідало звичайним річним показникам вегетації цієї рослини (табл. 2).

Упродовж обох років досліджень найбільш інтенсивне наростання біомаси спостерігалося у кореневій системі рослин. У 2023 році на забрудненій ділянці маса коренів становила 1,12 кг/м^2, тоді як маса стебел і листків – відповідно 0,268 та 0,048 кг/м^2. У 2024 році ці показники збільшилися до 3,86, 1,506 та 0,309 кг/м^2 відповідно.

Таблиця 1

Вміст важких металів у дерново-підзолистому ґрунті після вибуху ракети, мг/кг ґрунту

Варіант	Важкі метали			
	Cd	Pb	Cu	Zn
Контроль (50 м від епіцентру вибуху)	0,53 0,51	3,2 3,1	20,4 19,8	23,6 22,9
Забруднена ділянка 1-5 м від границі воронки (зона вигорання)	4,16 3,72	104 96	262 231	584 508
$НіР_{05}$	0,38	7,9	18,4	35,2

Примітка: чисельник – 2023 рік, знаменник – 2024 рік

Таблиця 2

Врожайність біомаси міскантусу гігантського у перший і другий роки вегетації, кг/м²

Варіант	Складові біомаси			Разом
	коріння	стебло	листки	
Контроль (50 м від епіцентру вибуху)	1,14 3,90	0,265 1,532	0,046 0,307	1,451 5,739
Забруднена ділянка 1-5 м від границі воронки (зона вигорання)	1,12 3,86	0,268 1,506	0,048 0,309	1,436 5,675
$НіР_{05}$	0,22	0,081	0,018	0,16

Примітка: чисельник – 2023 рік, знаменник – 2024 рік. Вміст сухої речовини у корінні – 30,2%, стеблах – 48,6%, листках – 51,3%

Таким чином, маса кореневої системи у 2023 році перевищувала масу стебел у 4,3 раза, а масу листків – у 24,8 раза. У 2024 році це співвідношення становило відповідно 2,6 та 12,5 раза. Загальна біомаса рослин у другий рік вегетації була приблизно у 4 рази більшою, ніж у перший.

Аналіз вмісту важких металів у рослинах міскантусу показав, що їхнє накопичення відбувалося переважно у кореневій системі. У середньому за два роки досліджень концентрація кадмію у коренях перевищувала його вміст у надземній біомасі у 5,2–5,7 раза, свинцю – у 17,9–20 разів, міді – у 3,6–4,8 раза, цинку – у 3,5–4,6 раза (табл. 3).

На забрудненій ділянці вміст важких металів у рослинах був значно вищим, ніж на контрольній території. Наприклад, у 2023 році концентрація кадмію у коренях становила 38,6 мг/кг, свинцю – 76,8 мг/кг, міді – 40,6 мг/кг, цинку – 161 мг/кг сухої речовини. У 2024 році ці показники зросли відповідно до 41,2; 82; 46,4 та 178 мг/кг.

Винос важких металів рослинами міскантусу з ґрунту також суттєво зростав упродовж другого року вирощування, що було пропорційно нарощуванню біомаси. У 2023 році винос кадмію становив 14,2 мг/м², свинцю – 26,7 мг/м², міді – 15,4 мг/м², цинку – 61,4 мг/м². У 2024 році ці показники зросли у 3,8–4,3 раза.

Основна частка вилучення металів із ґрунту забезпечувалася за рахунок кореневої системи рослин. Так, у другий рік вегетації частка кореневої системи у загальному виносі становила 87% для кадмію, 95% для свинцю та 83% для міді. Для цинку цей показник був нижчим і становив 43%, тоді як 57% накопичувалося у надземній біомасі (табл. 4).

Розрахунок ефективності фіторемедіації, зниження вмісту важких металів у ґрунті, показав, що рослини міскантусу на забрудненій ділянці за дворічного (2023-2024 рр.) циклу вирощування зменшили вміст кадмію у ґрунті порівняно з початковим забрудненням на 10,6%, свинцю – на 7,7%, міді – на 11,8%, цинку – на 13,0% (рис.1).

Отримані результати підтверджують високу здатність міскантусу до акумуляції важких металів і свідчать про перспективність використання цієї культури у технологіях фіторемедіації земель, забруднених унаслідок військових дій.

Висновки. За даними проведених досліджень у 2023-2024 рр. встановлено, що вибух ракети типу Х-22/Х-32 спричинив значне забруднення орного 0–20-см шару дерново-підзолистого ґрунту важкими металами. У зоні вигорання (1–5 м від границі воронки вибуху) встановлено таку послідовність накопичення металів: Zn > Cu > Pb > Cd. Концентрація кадмію перевищувала контроль у 7,9 раза, свинцю – у 32,5 раза, міді – у 12,8 раза, цинку – у 24,7 раза.

Міскантус гігантський, висаджений у зоні вигорання, характеризувався високою продуктивністю біомаси. Урожайність становила 1,436 кг/м² у перший рік вегетації та 5,675 кг/м² у другий рік, що свідчить про інтенсивне наростання рослинної маси навіть за умов забруднення ґрунту.

Упродовж двох років досліджень основна частка важких металів акумулювалася у корене-

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

Таблиця 3

Вміст важких металів у рослинах міскантусу наприкінці вегетації, мг/кг сухої речовини

Варіант	Метали	Складові біомаси		
		коріння	стебло	листки
Контроль (50 м від епіцентру вибуху)	Cd	0,31 0,33	0,24 0,24	0,20 0,21
	Pb	3,2 3,2	1,6 1,7	1,7 1,8
	Cu	4,2 4,5	3,0 3,0	3,2 3,2
	Zn	20,4 21,0	7,7 7,8	6,0 6,4
HiP_{05}		0,6	0,32	0,27
Забруднена ділянка 1-5 м від границі воронки (зона вигорання)	Cd	38,6 41,2	7,4 8,4	6,8 7,4
	Pb	76,8 82,0	4,3 4,7	3,9 4,1
	Cu	40,6 46,4	11,2 13,4	8,5 9,6
	Zn	161 178	46 53	35 40
HiP_{05}		4,4	0,9	0,7

Примітка: чисельник – 2023 рік, знаменник – 2024 рік.

Таблиця 4

Винос важких металів із ґрунту рослинами міскантусу на забрудненій ділянці, мг/м²

Варіант	Метали	Складові біомаси			Разом
		коріння	стебло	листки	
Забруднена ділянка 1-5 м від границі воронки (зона вигорання)	Cd	13,2 48,3	1,0 6,3	0,2 1,2	14,2 55,8
	Pb	26,0 96,1	0,6 3,7	0,1 0,7	26,7 101
	Cu	13,7 54,4	1,5 9,8	0,2 1,5	15,4 65,7
	Zn	54,5 108	6,0 38,8	0,9 6,5	61,4 253

Примітка: чисельник – 2023 рік, знаменник – 2024 рік.

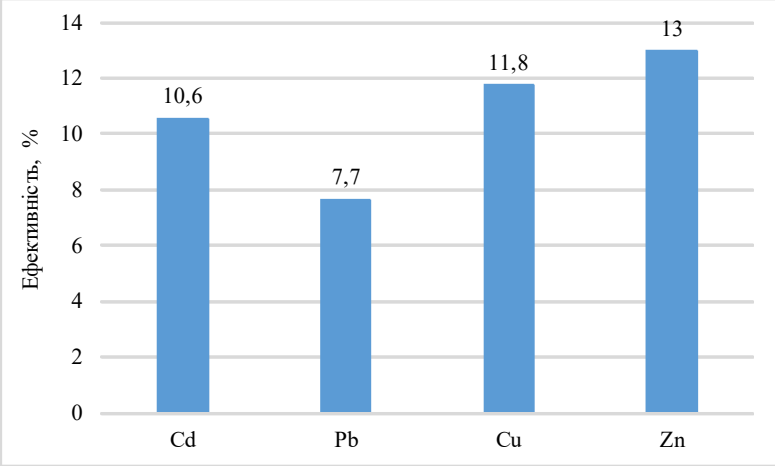


Рис. 1. Ефективність фіторемедіації важких металів рослинами міскантусу на забрудненій ділянці 1-5 м від границі воронки (зона вигорання) за 2023–2024 роки вирощування, %

вій системі рослин. Концентрація кадмію у коренях перевищувала його вміст у надземній біомасі у 5,2–5,7 раза, свинцю – у 17,9–20 разів, міді – у 3,6–4,8 раза, цинку – у 3,5–4,6 раза.

Винос важких металів рослинами міскантусу з ґрунту у 2023 році становив: кадмію – 14,2 мг/м², свинцю – 26,7 мг/м², міді – 15,4 мг/м², цинку – 61,4 мг/м². У другий рік вирощування ці показники зросли у 3,8–4,3 раза. Важкі метали міскантус виносив переважно за рахунок акумуляції у кореневій системі. На другому році вегетації акумуляція кадмію у кореневій системі від загального виносу становила 87%, свинцю – 95%, міді – 83%, за винятком цинку, якого коренева система акумулювала 43%, а решта 57% містилась у наземній біомасі.

Вирощування міскантусу на забрудненій ділянці упродовж двох років сприяло зниженню вмісту кадмію у ґрунті порівняно з початковим забрудненням на 10,6%, свинцю – на 7,7%, міді – на 11,8%, цинку – на 13,0%, що підтверджує перспективність використання цієї культури для фіторемедіації земель, пошкоджених унаслідок військових дій.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати мають вагоме наукове і практичне значення, поглиблюють фундаментальні знання з питань обігу важких металів у ланцюгу «ґрунту-рослина» та їх акумуляції рослинами міскантусу. Практична цінність досліджень полягає в тому, що вони є основою для удосконалення технології фіторемедіації ґрунтів легкої текстури від важких металів, які зазнали пошкоджень і екологічного забруднення внаслідок військових дій.

Перспективним напрямом є розширення досліджень з вирощування міскантусу для фіторемедіації ґрунтів інших ґрунтово-кліматичних зон. Це є фундаментом для поглиблення знань щодо механізмів трансформації важких металів кадмію, свинцю, міді та цинку у ґрунті залежно від їх властивостей, визначення доступності та інтенсивності накопичення важких металів рослинами міскантусу.

Література

1. Скільки території України окупувала росія? Аналітичний портал слово і діло. URL: https://www.slovoidilo.ua/2025/12/17/infografika/suspilstvo/skilky-terytoriyi-ukrayiny-okupuvala-rosiya (дата звернення 05.05.2026)
2. Yakymchuk A., Balanda O., Bzowska-Bakalarz M. Assessment of soil contamination of Ukraine with heavy metals during the war. *Scientific Papers of Silesian University of Technology*. *Seria Organizacji i Zarzadzanie*. 2024. Vol. 196. P. 667–685. URL: http://dx.doi. org/10.29119/1641–3466.2024.196.45 (date of access: 28.04.2026)
3. Allami M. H., Alobaidy A. H. M., Alsudani I. M. Assessment of ecological pollution of heavy metals in surface soils of different sites within northwest of Iraq. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 779, no. 1. 012063. URL: https://doi.org/10.1088/1755–1315/779/1/012063 (date of access: 28.04.2026)
4. Greiciute K., Juozulynas A., Surkiene G., Valeikiene V. Research on soil disturbance and pollution with heavy metals in military grounds. *Geologija*. 2007. Vol. 57. P. 14–20.
5. Datsko O., Zakharchenko E., Butenko Y., Melnyk O., Kovalenko I., Onychko V., Ilchenko V., Solokha M. Ecological Assessment of Heavy Metal Content in Ukrainian Soils. *Journal of Ecological Engineering.* 2024. Vol. 25, no. 11. P. 100–108. URL: https://doi.org/10.12911/22998993/192669 (date of access: 04.05.2026)
6. Razanov S., Alieksieiev O., Bakhmat O., Bakhmat M., Lytvyn O., Alieksieieva O., Vradii O., Mazur K., Razanova A., Mazurak I. Accumulation of Chemical Elements in the Vegetative Mass of Energy Cultures Grown on Gray Forest Soils in the Western Forest Steppe of Ukraine. *Journal of Ecological Engineering*. 2024. Vol. 25, no. 9. P. 282–291. URL: https://doi.org/10.12911/22998993/191439 (date of access: 04.05.2026)
7. Martynova N., Kolombar T. Phytoremediation technologies promising for the restoration of agricultural lands damaged by military actions. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. 2025. Vol. 16, no. 3. e25155. URL: https://doi.org/10.15421/0225155 (date of access: 26.04.2026)
8. Aparicio J. D., Raimondo E. E., Saez J. M., Costa-Gutierrez S. B., Alvarez A., Benimeli C. S., Polti M. A. The current approach to soil remediation: A review of physicochemical and biological technologies, and the potential of their strategic combination. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2022. Vol. 10, no. 2. 107141. URL: http://dx.doi. org/10.1016/j.jece.2022.107141 (date of access: 04.05.2026)
9. Brunetti G., Farrag K., Rovira P. S., Nigro F., Senesi N. Greenhouse and field studies on Cr, Cu, Pb and Zn phytoextraction by Brassica napus from contaminated soils in the Apulia Region, Southern Italy. *Geoderma*. 2011. Vol. 160, no. 3-4. P. 517–523. URL: http://dx.doi. org/10.1016/j.geoderma.2010.10.023 (date of access: 28.04.2026)
10. Cojocaru P., Gusiatin Z. M., Cretescu I. Phytoextraction of Cd and Zn as single or mixed pollutants from soil by rape (Brassica napus). *Environmental Science and Pollution Research*. 2016. Vol. 23. P. 10693–10701. URL: http://dx.doi.org/10.1007/s11356-016-6176-5 (date of access: 04.05.2026)
11. Gomes L., Cumbane B., Costa J., Pires J., Rodrigues C., Santos F., Fernando A. L. Phytoremediation potential of the perennial crops giant reed and switchgrass to soils contaminated with heavy metals. *In: Proceedings of the 27th European Biomass Conference and Exhibition. EUBCE*. 2019. P. 175–177. URL: http://dx.doi. org/10.5071/27thEUBCE2019-1BV.8.3 (date of access: 26.04.2026)
12. Кравчук В. І., Квак В. М., Цвігун Г. В., Іванюта М. В., Кононюк Н. О., Атаманюк О. М., Гуменюк Ю. О. Проблематика виробництва садивного матеріалу міскантусу гіганського. *Біоенергетика*. 2022. Т. 19, № 1. С. 35–42. DOI: 10.47414/be.1-2.2022.271353 (date of access: 26.04.2026)
13. Роїк М. В., Кравчук В. І. Міскантус гігантеус: горизонти інноваційних досліджень. *Біоенергетика*. 2023. № 1–2. С. 4–6. DOI: https: 10.47414/be.1-2.2023.290613 (дата звернення: 05.05.2026)

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

14. Kocon A., Jurga B. The evaluation of growth and phytoextraction potential of Miscanthus x giganteus and Sida hermaphrodita on soil contaminated simultaneously with Cd, Cu, Ni, Pb, and Zn. *Environmental Science and Pollution Research*. 2017. Vol. 24. P. 4990–5000. URL: http://dx.doi.org/10.1007/s11356-016-8241-5 (date of access: 28.04.2026)
15. Alasmary Z., Hettiarachchi G. M., Roozeboom K. L., Davis L. C., Erickson L. E., Pidlisnyuk V., Stefanovska T., Trogl J. Phytostabilization of a contaminated military site using Miscanthus and soil amendments. *Journal of Environmental Quality*. 2021. Vol. 50, no. 5. P. 1220–1232. URL: https://doi.org/10.1002/jeq2.20268 (date of access: 26.04.2026)
16. Харитонов М. М., Мартинова Н. В., Бабенко М. Г., Клімкіна І. І. Оцінка виносу макро- та мікроелементів надземною масою міскантусу, вирощеного на техноземах. *Екологічні науки*. 2025. Т. 58, № 1. С. 117–122. DOI: 10.32846/2306-9716/2025.eco.1-58.20 (дата звернення: 05.05.2026)

Дата першого надходження статті до видання: 30.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 504.53.054:623.45
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.2

АЛЮМІНІЙ ЯК ІНДИКАТОРНИЙ МАРКЕР ЗАЛИШКОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ ВИБУХОВИМИ РЕЧОВИНАМИ

Дудар В.В.
Національний університет «Київський авіаційний інститут»
пр. Любомира Гузара, 1, 03680, м. Київ
mister-vlad@ukr.net

Досліджено фундаментальні проблеми та методологічні обмеження сучасного екологічного моніторингу територій, що зазнали інтенсивного мінно-вибухового впливу. Обґрунтовано екотоксикологічну нестабільність первинних вибухових речовин у ґрунтовому середовищі під впливом термічної деструкції, фотолізу та мікробіологічної активності. Доведено, що ці процеси призводять до стрімкої трансформації органічної матриці у вторинні метаболіти, що зумовлює отримання хибно-негативних результатів під час стандартного хроматографічного аналізу навіть за наявності чітких візуальних індикаторів забруднення (“explosive soil”). З метою подолання цієї методологічної проблеми запропоновано та інструментально верифіковано використання дисперсного алюмінію як стабільного неорганічного маркера військово-техногенного забруднення. На основі аналізу компонентного складу масових алюмінізованих боєприпасів встановлено, що металевий додаток становить вагому частку (від 16% до 34%) заряду та формує репрезентативний хімічний слід. За результатами натурних досліджень на деокупованих територіях зафіксовано формування значних техногенних аномалій дисперсного металу. В епіцентрах ураження концентрація алюмінію досягала 168 000 мг/кг (16,8% сухої маси), що більш ніж удвічі перевищує максимально можливий природний фон для лесових чорноземів України (55 000 – 75 000 мг/кг). Доведено, що такий рівень диференціації дозволяє достовірно ідентифікувати зони екологічного ризику. Запропоновано комплексний підхід, який поєднує геохімічний скринінг за алюмінієвим маркером із даними операторів протимінної діяльності. *Ключові слова:* екологічна безпека територій, залишкове забруднення вибухонебезпечних предметів, забруднення вибуховими речовинами, екологічний моніторинг, дисперсний алюміній, продукти трансформації вибухових речовин.

Aluminum As An Indicator Marker Of Residual Soil Contamination By Explosives. Dudar V.
The fundamental problems and methodological limitations of modern environmental monitoring of territories subjected to intensive mine and explosive impact are investigated. The ecotoxicological instability of primary explosives in the soil environment under the influence of thermal destruction, photolysis, and microbiological activity is substantiated. It is proven that these processes lead to the rapid transformation of the organic matrix into secondary metabolites, which causes false-negative results during standard chromatographic analysis even in the presence of clear visual indicators of contamination ("explosive soil"). In order to overcome this methodological problem, the use of dispersed aluminum as a stable inorganic marker of military and technogenic contamination is proposed and instrumentally verified. Based on the analysis of the component composition of mass aluminized munitions, it was established that the metal additive constitutes a significant share (from 16% to 34%) of the charge and forms a representative chemical trace. According to the results of field studies in de-occupied territories, the formation of significant technogenic anomalies of dispersed metal was recorded. In the epicenters of the impact, the aluminum concentration reached 168,000 mg/kg (16.8% of dry mass), which is more than twice the maximum possible natural background for loess chernozems of Ukraine (55,000 – 75,000 mg/kg). It is proven that such a level of differentiation allows for reliable identification of ecological risk zones. A comprehensive approach is proposed that combines geochemical screening for the aluminum marker with data from mine action operators. *Key words:* environmental safety of territories, residual contamination of explosive remnants of war, contamination by explosives, environmental monitoring, dispersed aluminum, explosive transformation products.

Постановка проблеми. Повномасштабна збройна агресія російської федерації спричинила значне забруднення території України вибухонебезпечними предметами (ВНП), що робить її одним найбільш замінованою країною світу [1; 2]. За інформацією Секретаріату Національного органу з питань протимінної діяльності, станом на березень 2026 року потенційно забрудненими в Україні залишаються 133,3 тис. км² територій, що співставно із площею Греції.

Проте забруднення довкілля вибухонебезпечними предметами не обмежується лише мінно-вибуховими ризиками та загрозами, а також полягає у залишковому забрудненню вибуховими речовинами, які у більшості випадків є токсичними та канцерогенними. Вибухові речовини потрапляють у ґрунтовий покрив не лише внаслідок цільового спрацювання боєприпасів (детонації), а й через процеси неповного згоряння (дефлаграції) або руйнування корпусів снарядів [3]. Потрапляючи у довкілля, ці сполуки ініціюють складні фізико-хімічні та біохімічні реакції, що призводять до трансформації мікробіологічного профілю ґрунту та накопичення токсичних речовин [4; 5]. Зокрема зафіксовано, що продукти трансформації вибухових речовин можуть зберігати фітотоксичність протягом

© Дудар В.В., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

десятиліть, радикально змінюючи умови функціонування агроекосистем [6].

На поточний час більшість стандартизованих протоколів екологічного моніторингу забруднення ґрунтів вибуховими речовинами, зокрема базовий міжнародний стандарт US EPA Method 8330, орієнтовані на пряму детекцію органічних залишків тротилу, гексогену, октогену тощо методами високоефективної рідинної хроматографії (HPLC) з ультрафіолетовим детектуванням [7]. Однак імплементація цих протоколів для масового обстеження деокупованих територій України стикається з певними труднощами. Наприклад, через 24–36 місяців після детонації, а в деяких випадках і відразу (в залежності від умов бойових дій), пряма індикація за протоколом EPA 8330 може давати хибнонегативні результати. Крім того, якщо ґрунт забруднений продуктами детонації специфічних сумішевих вибухових речовин, які не входять до стандартної бібліотеки аналітів, лабораторний скринінг також може показати хибнонегативний результат.

Крім того, навіть за умови правильного вибору цільового аналіту, виявлення залишків вибухових речовин критично ускладнюється фізикою їхнього розподілу. На відміну від агрохімікатів чи нафтопродуктів, які розповсюджуються дифузно (плямами), продукти детонації осідають у вигляді мікроскопічних твердих частинок. Фундаментальні дослідження Інженерного корпусу армії США (USACE) доводять, що забруднення вибуховими речовинами має гетерогенний точковий характер, який називається ефектом “hotspots” [9; 10]. Концентрація токсиканту в одній точці може перевищувати 10 000 мг/кг, тоді як у зразку ґрунту, відібраному лише за 10 сантиметрів поруч, забруднення може бути майже нульовим [11].

Через відсутність універсального індикатора традиційні аналітичні методи можуть виявлятися нездатними ідентифікувати нетипові токсиканти, якими і являються вибухові речовини [8].

Актуальність дослідження. Масштабне забруднення території України вибухонебезпечними предметами, вибуховими речовинами та продуктами їх трансформації формує безпрецедентний виклик для системи забезпечення екологічної безпеки держави. Зі збільшенням часового інтервалу після завершення активних бойових дій традиційні підходи до екологічного моніторингу можуть втрачати свою репрезентативність. Органічні складові вибухових речовин піддаються інтенсивній фізико-хімічній та мікробіологічній трансформації у ґрунтовому профілі. Цей процес призводить до часткової зміни первинних токсикантів, що робить їх пряму детекцію стандартизованими хроматографічними методами неефективною, створюючи ризик прихованого пролонгованого впливу на довкілля та населення.

З огляду на зазначене, виникає необхідність установлення надійного, екологічно стабільного неорганічного маркера, здатного забезпечити ретроспективну ідентифікацію забруднення. Таким універсальним індикатором виступає дрібнодисперсний алюміній, який є базовою високоенергетичною добавкою у переважній більшості сучасних порохових сумішей. Його перехід під час детонації у стійкі оксидні форми створює довготривалий геохімічний слід, що зберігається в ґрунті незалежно від швидкості трансформації органічної матриці боєприпасу. Крім того, перевагою такого підходу є його висока економічна рентабельність, так як масове лабораторне визначення алюмінію методами спектрометрії є базовою, технологічно доступною та на порядки дешевшою процедурою порівняно з високовартісним хроматографічним пошуком специфічних органічних сполук.

Проте, на поточний час стандартні агрохімічні аналізи ґрунтів зазвичай не включають визначення алюмінію, оскільки цей елемент перебуває в інертній формі у складі глинистих мінералів і не впливає на родючість при нейтральній реакції середовища. Крім того, методики масового скринінгу орієнтовані на рухомі форми поживних речовин (азот, фосфор, калій), тоді як для фіксації валового вмісту алюмінію як техногенного маркера потрібні специфічні методи розкладу проб або рентгенофлуоресцентний аналіз.

Зв’язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Представлене дослідження безпосередньо пов’язане з виконанням стратегічних державних завдань щодо подолання екологічних наслідків війни та безпечного повернення земель в агровиробництво. Відповідно до Операційного плану заходів з реалізації у 2024-2026 роках Національної стратегії протимінної діяльності (розпорядження КМУ від 28.06.2024 № 616-р), визначено завдання із реалізації завдання 10 щодо зменшення впливу забруднення вибухонебезпечними предметами (ВНП) на довкілля та управління відповідними ризиками. Крім того, на виконання пункту 7 протоколу засідання Національного органу з питань протимінної діяльності, затвердженого рішенням Прем’єр-міністра України (від 18.07.2024 № 19121/1/1-24), має бути впроваджене інструментально-лабораторний контроль земель сільськогосподарського призначення при проведенні контролю якості розмінування. Авторський доробок пропонує науково-методичний інструментарій, який може застосовуватися для реалізації цих нормативних вимог.

Водночас, поточна практика екологічної оцінки забруднення довкілля внаслідок ведення бойових дій часто демонструє концептуальні помилки та нераціональне використання обмежених ресурсів в умовах активних бойових дій. Багато досліджень витрачають значні кошти на лабораторний пошук важких металів від вибухонебезпечних предметів, ігноруючи той факт, що вони масово присутні лише у специфічних видах боєприпасів (такі як запалювальні,

освітлювальні тощо). Іншою поширеною хибою є пошук залишків вибухових речовин безпосередньо у вирвах від розривів. З огляду на фізику процесу, повнота детонації штатного боєприпасу становить близько 99,999%, тому шукати там високі концентрації вибухових речовин у вирвах є недоцільним.

Усвідомлюючи ці прогалини, автор, спираючись на власний практичний досвід, пропонує простий, науково обґрунтований і значно дешевший варіант для застосування під час проведення первинної оцінки забруднення, а саме обов'язкове визначення вмісту алюмінію. Оскільки алюміній є поширеним компонентом багатьох сучасних порохових сумішей, його фіксація слугує індикатором залишкового забруднення вибухонебезпечних предметів. Такий підхід дає змогу швидко провести первинний скринінговий аналіз значних площ та сфокусувати подальший, більш складний і дорогий інструментальний контроль лише на тих ділянках, де ризик забруднення токсичними вибуховими речовинами є підтвердженим.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема екологічних наслідків військових (бойових) дій традиційно розглядалася наукою переважно через призму забруднення ґрунтів важкими металами (свинець, кадмій, нікель тощо), проте упускаючи із виду алюміній. Проте сучасні глобальні дослідження переконливо доводять, що пріоритетною екотоксикологічною загрозою є залишки вибухових речовин. Фундаментальні праці провідних екотоксикологів розкривають складні механізми біодеградації та фітотоксичності більшості вибухових речовин, особливо тротилу та гексогену [12]. Ці дослідження наголошують на здатності вибухових речовин не лише тривалий час зберігатися у довкіллі, але й активно мігрувати у ґрунтових водах та акумулюватися в кореневих системах сільськогосподарських культур, створюючи пряму загрозу продовольчій безпеці [3].

Попри чітке усвідомлення небезпеки, ідентифікація та кількісне визначення вибухових речовин у ґрунтах супроводжується низкою критичних аналітичних проблем. Як зазначають фахівці Інженерного центру досліджень і розробок армії США (US Army ERDC-CRREL), головною перешкодою під час польових досліджень є екстремальна просторова гетерогенність розподілу часток вибухових речовин. Це явище призводить до того, що концентрація токсикантів може відрізнятися на кілька порядків навіть у межах одного квадратного метра [13]. Відповідно, стандартні методи відбору проб часто дають хибнонегативні результати або критичну статистичну похибку.

Іншою суттєвою проблемою є інструментальна та фінансова складність самого лабораторного аналізу. Класичні міжнародні протоколи, зокрема метод US EPA 8330, вимагають застосування високоефективної рідинної хроматографії або газової хроматографії з мас-спектрометрією [7]. Ці методи передбачають багатоетапну пробопідготовку, використання дорогих хімічних реактивів та наявність висококваліфікованого персоналу. Крім того, під дією чинників довкілля первинні вибухові речовини швидко трансформуються у високотоксичні похідні (наприклад тротил у дінітротолуоли), що вимагає розширення спектра аналітичних стандартів, що додатково здорожчує процедуру контролю [15]. У практиці застосування таких методів для масового скринінгу сотень тисяч гектарів забруднених ґрунтів є економічно нераціональним.

Аналіз публікацій свідчить про дефіцит досліджень щодо використання непрямих, економічно вигідних маркерів визначення забруднення ґрунтів вибуховими речовинами. Зокрема, поза належною увагою залишається алюміній, який є базовим компонентом більшості сучасних порохових сумішей. Хоча методики визначення вмісту важких металів добре відпрацьовані, стандартизовані та доступні, науково-методичний потенціал обов'язкового визначення алюмінію як індикатора забруднення території вибуховими речовинами з метою оптимізації лабораторного контролю практично не розкритий.

Новизна. Наукова новизна одержаних результатів полягає у формуванні нового, експериментально підтвердженого підходу до первинної екотоксикологічної оцінки та інструментального контролю територій, що зазнали забруднення внаслідок ведення військових (бойових) дій, зокрема:

удосконалено алгоритм оцінки забруднення довкілля вибуховими речовинами за рахунок урахування специфіки хімічного складу сучасних засобів ураження. Оцінено та підтверджено, що масове застосування алюмінію (як добавки для підвищення потужності у фугасних, термобаричних та сумішевих вибухових речовинах) формує специфічний хімічний слід у довкіллі. Використання цього факту дозволяє як додатковий інструмент оцінки використовувати економічно недорогий маркер;

на основі власних польових та лабораторних досліджень науково обґрунтовано необхідність визначення масової частки алюмінію як індикатора забруднення ґрунтів залишками вибухових речовин. Експериментально підтверджено, що аномалії просторового розподілу алюмінію в ґрунтовому профілі є достовірним маркером масштабного забруднення ґрунтів вибуховими речовинами, що дозволяє використовувати його для швидкого скринінгу перед проведенням подальших дороговартісних лабораторних досліджень.

Методологічне та загальнонаукове значення дослідження. Загальнонаукове значення дослідження полягає у розвитку теорії екологічного моніторингу забруднення ґрунтів вибухонебезпечними предметами. Обґрунтовано нову концепцію непрямої хімічної індикації, а саме використання алюмінію для виявлення забруднення високотоксичними

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

вибуховими речовинами та продуктами їх трансформації. Доведено, що оскільки алюміній є масовим компонентом сучасних порохових сумішей, його просторовий розподіл у ґрунтовому профілі відображає межі розльоту продуктів детонації та дефлагації вибухових речовин. Це вирішує проблему пошуку залишкового забруднення вибухонебезпечних предметів, яка також трансформується, мігрує та має просторову нерівномірність.

Методологічне значення роботи полягає у розробці економічно доцільного алгоритму інструментального обстеження земель, які зазнали впливу вибухонебезпечних предметів. Науково доведено необхідність визначення масової частки алюмінію як одного із етапів первинного скринінгу забруднення ґрунтів внаслідок ведення військових (бойових) дій. Цей методологічний підхід пропонується як швидке картування територій за допомогою доступних методів вимірювання алюмінію, що дає змогу локалізувати епіцентри забруднення і проводити складні хроматографічні дослідження виключно в межах підтверджених збільшення кількості алюмінію. Проте запропонований алгоритм первинного скринінгу базується на обов'язковому визначенні алюмінію в комплексі з іншими портативними приладами експрес-аналізу. Крім того, ключовою умовою методології є прив'язка результатів скринінгу до офіційних звітних документів операторів протимінної діяльності.

Викладення основного матеріалу. На поточний час більшість вибухонебезпечних предметів, які застосовуються у сучасних збройних конфліктах, в тому числі під час вторгнення російської федерації на територію України, використовують як основний заряд вторинні (бризантні) вибухові речовини, які являють собою переважно органічні сполуки, такі як тротил, гексоген, октаген тощо. Значна частина боєприпасів (стандартні артилерійські снаряди, міномети міни, базові інженерні боєприпаси) споряджається індивідуальними вибуховими речовинами у чистому вигляді, насамперед литим або пресованим тринітротолуолом (тротилом), який завдяки своїй природній стабільності не потребує додаткової флегматизації. Водночас більш потужні, але високочутливі бризантні речовини (гексоген, октоген, ТЕН) у чистому вигляді практично не застосовуються через ризик передчасної детонації. Їх обов'язково переводять у композиції (суміші), додаючи флегматизатори (віск, парафін, церезин) для зниження чутливості та забезпечення безпеки експлуатації [16].

Однак, коли перед конструкторами озброєння стоїть технічне завдання кардинально підвищити руйнівну (фугасну) дію, бронепробивність або створити яскраво виражений ефект (освітлювальний, запалювальний чи термобаричний), до складу базових вибухових речовин обов'язково додають енергетичний підсилювач, а саме мікродисперсний алюміній. Проте важливо підкреслити, що далеко не всі вибухові речовини мають у своєму складі метали. Проте саме алюмінізовані композиції становлять основу найбільш потужних, руйнівних і масових видів озброєння сучасних війн.

Причина масового використання саме алюмінію полягає в унікальній фізико-хімічній реакції окиснення. Під час детонації алюмінієва пудра не реагує миттєво у вибуховій хвилі, а вступає у реакцію вторинного післядетонаційного згоряння з киснем повітря та газоподібними продуктами детонації вибухової речовини. Ця екзотермічна реакція різко піднімає температуру в епіцентрі вибуху (до 3500–4000 °C) і виділяє колосальну кількість додаткової теплової енергії [17]. Завдяки цьому значно пролонгується фаза позитивного надлишкового тиску ударної хвилі (збільшується імпульс).

Аналіз доктрини конструювання озброєння держав-членів НАТО свідчить, що алюмінізовані порохові суміші використовуються переважно у високопотужних боєприпасах, а саме:

Бінарні суміші: Тритонал (80% тротилу, 20% алюмінієвої пудри). Застосування: американські авіабомби загального призначення (лінійка Mark: Mk 82, Mk 83, Mk 84).

Третинні суміші: Амонал (60–90% нітрату амонію, тротил/гексоген, до 15% алюмінію). Застосування: інженерні підривні заряди. Мінол (40% тротилу, 40% нітрату амонію, 20% алюмінію). Застосування: морські донні міни, глибинні бомби; Торпекс (41,6% гексогену, 39,7% тротилу, 18% алюмінію та віск). Застосування: бойові частини торпед (Mark 46), морські міни; НТА-3 (49% гексогену, 29% тротилу, 22% алюмінію). Застосування: спеціалізовані бетонобійні авіабомби; HBX (HBX-1, HBX-3) (гексоген, тротил, від 17% до 34% алюмінію, віск, лецитин). Застосування: бойові частини сучасних торпед та ракет-торпед.

Чотирьохкомпонентні суміші: DBX (40% тротилу, 21% гексогену, 21% нітрату амонію, 18% алюмінію). Застосування: спеціалізовані протичовнові глибинні бомби.

Натомість радянська (та сучасна російська) військова школа впровадила використання алюмінієвої пудри набагато масовіше, охопивши практично весь спектр засобів ураження, а саме:

Суміші на основі тротилу та гексогену (ТГА): ТГА-16 (60% тротилу, 24% гексогену, 16% алюмінію). Застосування: масове спорядження 152-мм та 203-мм осколково-фугасних снарядів, фугасних авіабомб (ФАБ-250, ФАБ-500); ТГАГ-5 та ТГАФ-5 (ТГА-16 + 5% флегматизатора). Застосування: бойові частини зенітних керованих ракет (ЗКР комплексів С-75, С-300), морські якірні міни, артилерійські осколково-фугасні боєприпаси тощо.

Бінарні тротил-алюмінієві суміші (ТА): ТА-16 (тротил + 16% алюмінію). Застосування: інженерні фугасні протитанкові міни (ТМ-62М зі спецпідривниками), подовжені заряди систем розміну-

вання (УР-77); ТА-80 (тротил + 20% алюмінію). Застосування: інженерні заряди великої потужності.

Високобризантні на основі гексогену (А-IX): А-IX-2 (80% гексогену, 20% алюмінію). Застосування: кумулятивні гранати до РПГ (ПГ-7В), 30-мм запалювально-фугасні снаряди до гармат 2А42 (БМП-2, БМП-3), 125-мм осколково-фугасні снаряди для танків; А-IX-10, А-IX-20 (80% гексогену, алюміній, озокерит). Застосування: бойові частини протитанкових керованих ракет (ПТРК «Конкурс», «Корнет»); Гекфал (А-IX-1 + 20% алюмінію). Застосування: артилерійські бронебійні та кумулятивні снаряди.

Спеціалізовані суміші: МС (19% тротилу, 58% гексогену, 17% алюмінію + флегматизатор). Застосування: протитанкові міни, бойові частини важких торпед тощо; ТОКАФ (12% тротилу, 60% октогену, 17% алюмінію + флегматизатор). Застосування: бойові частини крилатих і балістичних ракет («Калібр», «Іскандер»).

Окремим джерелом надходження алюмінію у довкілля є метальні вибухові речовини (пропіленти). Відповідно до профільної військово-технічної літератури з порохової справи, якщо класичні артилерійські та мінометні порохи (які у більшості випадках залишаються у каналі ствола) зазвичай не містять металевих додатків, то сучасні сумішеві тверді ракетні палива, які часто узагальнюються терміном тверде ракетне паливо (яке часто застосовується у реактивних системах залпового вогню і вилітає разом із основним зарядом), можуть містити значну їх кількість [18].

Тверде ракетне паливо складаються з полімерної зв'язки, окисника (перхлорату амонію) та алюмінієвого порошку сферичної форми (марок АСД-1 або АСД-4), який відіграє роль базового висококалорійного пального. У маршових двигунах реактивних систем залпового вогню (РСЗВ типу «Град», «Ураган», «Смерч»), а також зенітних та оперативно-тактичних ракет масова частка алюмінію становить від 12% до 22% від загальної маси паливного заряду. Враховуючи, що двигун ракети РСЗВ містить десятки кілограмів такого палива, під час його роботи утворюється об'ємний газодинамічний шлейф. Продукти згоряння порохової суміші (зокрема, оксиди алюмінію та незгорілі мікрочастинки металу) осідають на ґрунтовий покрив уздовж траєкторії польоту, а у випадку неповного вигоряння чи руйнування ракети можуть концентровано потрапляють у ґрунт на місці падіння [18].

Окрім бризантних вибухових речовин та ракетних палив, вагомим джерелом емісії дисперсного алюмінію в довкілля є широка номенклатура піротехнічних складів, що використовуються в засобах ініціювання, освітлення та цілевказання. Піротехнічні суміші являють собою механічні системи, що складаються з окислювача та металевого

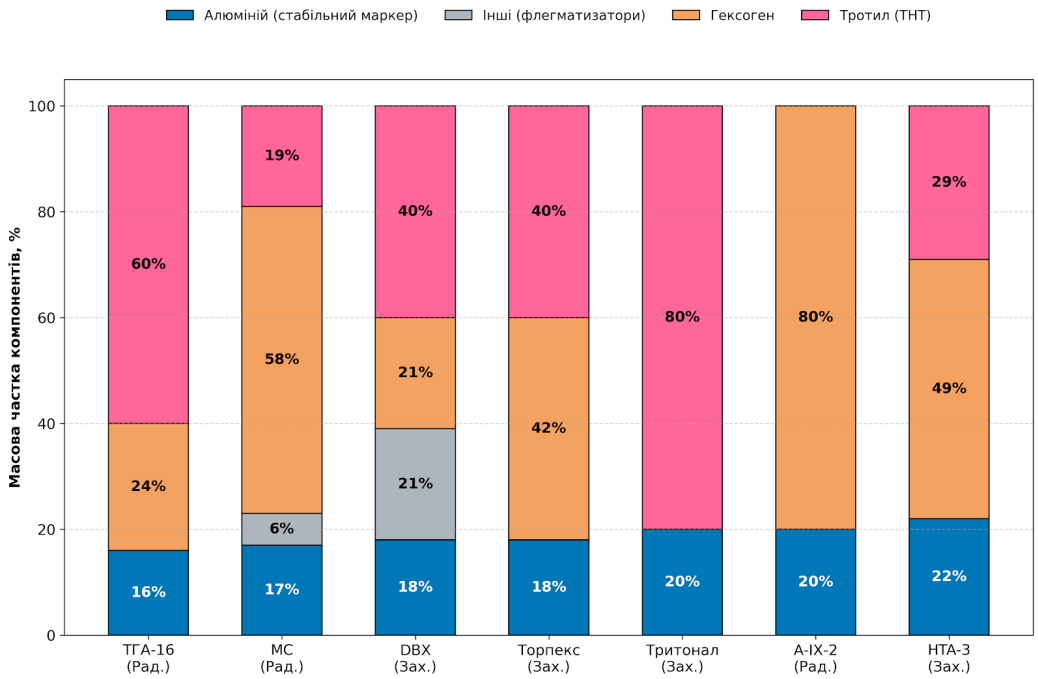


Рис. 1. Компонентний склад деякий порохових сумішей.

Примітки: вказані тільки деякі типи порохових сумішей. Рад. – радянські порохові суміші, Зах. – західні (держав-членів НАТО).

Джерело: графік розроблений автором.

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

пального, принципи маркування яких подібні до сумішевих твердих палив.

Аналіз рецептур основних типів піротехнічних засобів підтверджує високу концентрацію алюмінію як ключового горючого компонента:

Запалювальні та димопідсилювальні склади (напр. ДУ-5): містять сумарно до 45% алюмінію (15% порошку та 30% пудри) у поєднанні з азотнокислим барієм та тротилом. Такі суміші при спрацюванні забезпечують інтенсивне розсіювання металевих часток.

Термітні суміші (ТР, Ф-45-4): засновані на механічних сумішах оксидів заліза та порошкоподібного алюмінію. У спеціалізованих запалювальних складах вміст алюмінію та магнію досягає 9% на фоні 57% термітної основи, що створює стійкі осередки високотемпературного хімічного забруднення.

Освітлювальні та трасуючі склади: використовують порошкоподібний магній, алюміній та їхні суміші як основне пальне. У трасуючих складах (зокрема № 5, 8, 9) алюмінієва пудра застосовується як у допоміжних (запалювальних), так і в основних сумішах, де роль окислювача виконують нітрати барію або стронцію.

Окремим фактором потрапляння алюмінію в довкілля в сучасних умовах ведення бойових дій є масове використання саморобних вибухових пристроїв та спеціалізованих боєприпасів для FPV-дронів і скидів, особливо які виготовляються у польових умовах без регуляторного промислового контролю.

Причиною використання алюмінієвої пудри (ПАП-1, ПАП-2) або його порошку (АСД) у таких виробах є поєднання високої енергоефективності та доступності компонентів. Додавання дисперсного алюмінію до амміачно-селітряних сумішей (амонали) або пластичних вибухових речовин дозволяє суттєво підвищити фугасну та термобаричну дію вибуху за рахунок високої теплоти окиснення металу.

З метою практичної верифікації забруднення ґрунтів вибуховими речовинами забруднення було проведено екотоксикологічне обстеження території знищеного у 2022 році складу артилерійського озброєння (Харківська область). Ця територія зазнала надзвичайного забруднення вибуховими речовинами, які можливо ідентифікувати візуально. Номенклатура боєприпасів на даному об'єкті була відома і включала вироби, споряджені вторинними бризантними вибуховими речовинами (переважно на основі тринітротолуолу та гексогену), а також алюмінізованими сумішами. Відбір проб ґрунту здійснювався поза межами епіцентрів прямого ураження та вирв у зонах, де відбір проб був безпечний (так як територія не розміновувалася).

Під час візуального обстеження локації було зафіксовано наявність характерного помаранчевого та червоно-помаранчевого забарвленням ґрунтового покриву (у фаховій літературі класифікується як «explosive or orange soil»). Даний феномен є візуальним індикатором наявності у ґрунті вибухових речовин, особливо тротилу. Під впливом ультрафіолетового випромінювання (фотоліз) та ґрунтової вологи молекули тротилу утворюють забарвлені фотохімічні полімери та комплекси Мейзенгеймера. Одночасно за участю ґрунтової мікробіоти відбуваються процеси відновлення нітрогруп з утворенням амінодинітротолуолів та діамінонітротолуолів (2-ADNT, 4-ADNT, 2,4-DNT, 2,6-DNT), які зв'язуються з гуміновими кислотами ґрунту. Варто уточнити, що продукти трансформації вибухових речовин є набагато стійкішими, небезпечними та токсичними за вихідну сполуку.

Через відсутність на момент проведення обстеження портативних приладів для первинного (скринінгового) аналізу безпосередньо в польових умовах, відібрані зразки були направлені відразу на дороговартісне дослідження до акредитованої лабораторії (Eurofins, Польща). Результати аналізу, проведеного методом рідинної хроматографії, показали, що концентрації тротилу, гексогену та інших базових вибухових речовин у всіх пробах знаходяться нижче межі кількісного визначення приладу (<0,1 мг/кг).

Отриманий хибнонегативний результат щодо вмісту вибухових речовин пояснюється їхньою фізико-хімічною нестабільністю у довкіллі. В умовах детонації та дефлагаційного горіння значна частина органічних сполук зазнала термічної деструкції, а ексудат вибухових речовин, що потрапив у ґрунт, трансформувався у вторинні метаболіти. Стандартні лабораторні протоколи, налаштовані на ідентифікацію виключно незмінених молекул первинних вибухових речовин, не фіксують наявність продуктів їхньої деградації. Проведення повторного спеціалізованого аналізу цих же зразків на наявність вторинних метаболітів не здійснювалося через високу вартість послуг європейської лабораторії та відсутність додаткового фінансування. Проте забруднення було наявне, так як виявлено наявне пригнічення росту рослинності та характерний колір ґрунту.

З огляду на наявність алюмінію у порохових сумішах у більшості боєприпасах, у цих же пробах було проведено визначення масової частки загального алюмінію. Відповідно до даних ґрунтознавства, для чорноземів України, сформованих на лесових породах, природний валовий вміст алюмосилікатів (у перерахунку на Al_2O_3) становить 11–14%, що відповідає фоновій концентрації загального алюмінію в межах 5,5–7,5% (55 000 – 75 000 мг/кг). При цьому природний алюміній інтегрований у кристалічні решітки мінералів і є екотоксикологічно інертним.

За результатами аналізу досліджуваних проб, концентрація алюмінію на окремих ділянках сягала 168 000 мг/кг (16,8% сухої маси). Таке перевищення максимальних фонових значень більш ніж удвічі свідчить про інтенсивне надходження антропогенного дисперсного металу внаслідок розсіювання

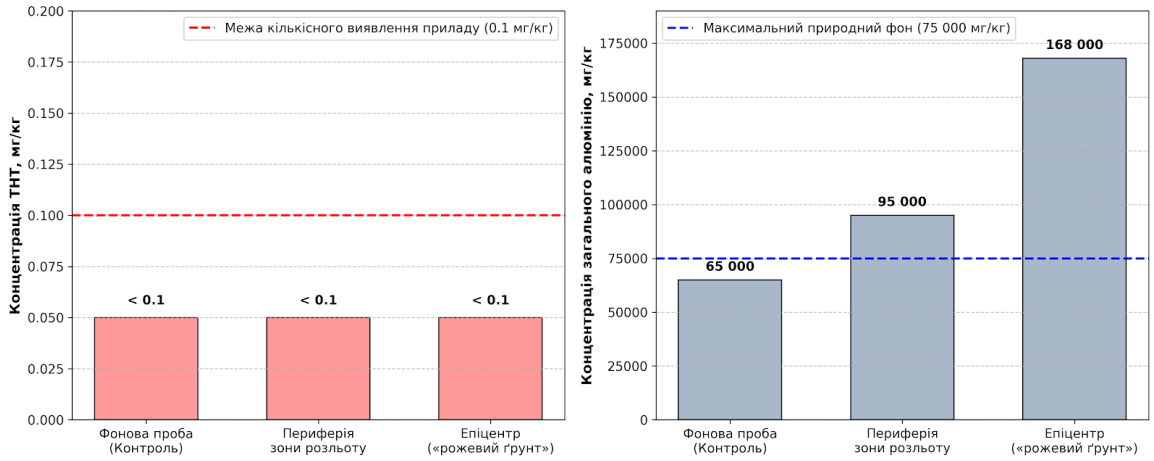


Рис. 2. Вміст тротилу (зліва) та алюмінію (справа) у досліджуваних пробах.

Примітки: коротка візуалізація проведених аналізів.

Джерело: результати аналізу, здійснені автором.



Рис. 3. Відібраний зразок ґрунту і візуальне його порівняння із фоновим зразком, який відібраний приблизно за 2 км.

Примітки: Відповідно до протоколу USAEC, ґрунти, що містять 5% вторинних вибухових речовин і більше мають утилізуватися на рівні вибухонебезпечного предмету. Візуальна зміна кольору ґрунту зазвичай фіксується там, де первинна концентрація тротилу становила від 1000 мг/кг і вище (0,1%). Це дуже значні концентрації, так як норми в США на тротил становлять 21 мг/кг, а при 100 мг/кг відбувається явне пригнічення росту рослинності.

Джерело: фотографія зроблена автором у грудні 2022 року в Харківській області.

алюмінізованих вибухових речовин. Хоча забруднення було як візуально, так і логічно підтверджено (знищений склад боєприпасів), але саме цей аналіз дозволив остаточно підтвердити про наявність значного забруднення ґрунтів вибуховими речовинами та продуктами їх трансформації, а також підтвердити гіпотезу про доцільність використання алюмінію як економічно вигідного індикатора цього забруднення.

Аналогічна проблема була виявлена під час проведення екологічного моніторингу на територіях Миколаївської області. Відбір проб ґрунту на ділянках, де здійснювалися заходи з гуманітарного розмінування, часто проводився без просторового узгодження з документацією операторів протимінної діяльності. За відсутності прив'язки до підтверджених місць вилучення. Знешкодження та знищення

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

вибухонебезпечних предметів, прямий пошук вибухових речовин давав негативні результати. Однак на локаціях, де попередньо фіксувалися аномальні концентрації алюмінію, подальший аналіз із застосуванням наявних скринінгових приладів дозволив ідентифікувати продукти трансформації енергетичних матеріалів та стабілізаторів (зокрема, Tris(2,4-di-tert-butylphenyl) phosphite, CAS 24964-94-8, який використовується як добавка до полімерних зв'язуючих, пластичних вибухових речовин (ПВР), а також у складі композитних ракетних палив).

Головні висновки. На основі теоретичного аналізу складів порохових сумішей сучасних засобів ураження, які застосовуються у російсько-українській війні, та практичних результатів екотоксикологічних досліджень на деокупованих територіях Харківської та Миколаївської областей, встановлено:

значна масова частка алюмінію, що міститься як у бризантних зарядах масових боєприпасів (16–20%), так і в метальних порохових сумішах ракетних систем (12–22%), формує стійкий і репрезентативний хімічний слід у довкіллі. На відміну від бризантних вибухових речовин, які в більшості є органічними сполуками та піддаються швидкій термічній та біологічній деградації, дисперсний алюміній є компонентом, що доводить доцільність його використання як маркера для первинного інструментального скринінгу зон військово-техногенного забруднення;

дослідженням встановлено, що природна фонова концентрація загального алюмінію у чорноземах України, сформованих на лесових породах, є стабільною і коливається в межах 5,5–7,5% (55 000–75 000 мг/кг), перебуваючи в інертній формі у складі алюмосилікатів. Натомість інструментальний аналіз зразків з епіцентрів забруднення виявив значну їх кількість до 168 000 мг/кг (16,8% сухої маси), що більш ніж дворазове перевищує фон і є беззаперечним доказом антропогенного походження металу. Це дозволило достовірно зафіксувати хімічний слід від ВНП у випадках, де аналіз на органічні сполуки показав хибнонегативний результат;

об'єктивна оцінка екологічного стану територій вимагає комплексного підходу, де ідентифікація за алюмінієвим маркером має обов'язково інтегрується з ретельним аналізом офіційних документів операторів протимінної діяльності. Опрацювання звітів з нетехнічного/технічного обстеження та актів передачі очищених земель забезпечує верифіковану просторову базу щодо типів і локалізації боєприпасів, що є критично важливим для валідації результатів геохімічного моніторингу.

Перспективи використання результатів дослідження. Наукове обґрунтування застосування алюмінію як маркера забруднення ґрунтів вибухонебезпечними предметами створює підґрунтя для модернізації алгоритмів екологічного контролю та відновлення територій, які зазнали забруднення внаслідок ведення військових (бойових) дій. Практичне впровадження результатів дослідження відкриває наступні перспективи:

1. Розробка та оновлення національних стандартів якості ґрунтів. Результати дослідження дозволяють ініціювати зміни до чинної нормативно-правової бази у сфері охорони земель. Традиційні агрохімічні протоколи, які ігнорують алюміній через його природну інертність у ґрунтах, мають бути доповнені методиками визначення валового вмісту металу як техногенного індикатора. Це дозволить законодавчо закріпити критерії розмежування природного фону (5,5–7,5%) та забруднення в наслідок ведення військових (бйових) дій (понад 10%), що є важливим для юридичної верифікації екологічних збитків.

2. Оптимізація витрат на масовий скринінг територій. Використання алюмінію як маркера дозволяє кардинально змінити економіку моніторингу. Замість дороговартісного хроматографічного пошуку органічних вибухових речовин, які часто трансформуються, пропонується впровадження оперативного польового скринінгу за допомогою портативних рентгенофлуоресцентних аналізаторів (XRF). Такий підхід забезпечує швидку локалізацію "гарячих точок" (hotspots) забруднення без вивезення проб за кордон. Також це дозволить знизити витрати на лабораторні дослідження на 60–80%, фокусуючи ресурси лише на підтвердженні складних продуктів трансформації у заздалегідь виявлених аномаліях.

3. Підвищення точності картування зон фітотоксичності. Оскільки стабільний алюміній корелює з місцями залягання мобільних і токсичних метаболітів (амінодинітротолуолів), його використання як трасера дозволяє створювати високоточні цифрові карти забруднення. Це мінімізує ризики вирощування агропродукції на ділянках із прихованою токсичністю, де візуальні ознаки забруднення вибуховим речовинами не вивляються, а хімічна небезпека в ґрунтовому розчині зберігається.

4. Валідація результатів гуманітарного розмінування. Запропонована методологія формує інструментальну базу для підтвердження якості розмінування. Інтеграція даних про вміст алюмінію зі звітами операторів протимінної діяльності (IMSMA) дозволяє підтверджувати відповідність фактичного забруднення ґрунту типам боєприпасів, зазначеним у актах виконаних робіт. Крім того, в рамках контролю якості розмінування це дозволить надавати власникам земель додаткові гарантії екологічної безпеки територій.

Література

1. Ukraine: 2023 Humanitarian Needs Overview / OCHA. 2023. 118 p. URL: https://reliefweb.int/report/ukraine/ukraine-2023-humanitarian-needs-overview-january-2023-enuk (дата звернення: 30.03.2026).

2. Clearing the Mines 2023 : report / Mine Action Review, GICHD. Geneva, 2023. 320 p.
3. Pichtel J. Distribution and Fate of Military Explosives and Propellants in Soil: A Review. Applied and Environmental Soil Science. 2012. Vol. 2012. P. 1–33.
4. Pennington J. C., Brannon J. M. Environmental fate of explosives. Thermochimica Acta. 2002. Vol. 384. P. 163–172.
5. Singh S., Ray K., Shrivastav P. Environmental fate of explosive residues: transformation and degradation. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology. 2012. Vol. 11. P. 113–132.
6. Bausinger T., Preuß J. Environmental assessment of former military sites: A review on the fate of energetic compounds. Science of The Total Environment. 2012. Vol. 416. P. 1–17.
7. Method 8330A. Nitroaromatics and Nitramines by High Performance Liquid Chromatography (HPLC) / U.S. Environmental Protection Agency. Washington, DC, 2007. 33 p.
8. Compositional and morphological changes in spark-ignited aluminum propellants / S. Taylor et al. Journal of Hazardous Materials. 2010. Vol. 177, Iss. 1-3. P. 605–611.
9. Identity and distribution of residues of energetic compounds at army live-fire training ranges / T. F. Jenkins et al. Chemosphere. 2006. Vol. 63, Iss. 8. P. 1280–1290. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2005.09.066.
10. Collection and Processing of Representative Samples for Energetic Residues / A. D. Hewitt et al. Environmental Forensics. 2007. Vol. 8, Iss. 1-2. P. 97–102. DOI: 10.1080/15275920601180585.
11. Geochemical and morphological characterization of post-detonation residues from aluminized explosives / M. C. Baddock et al. Science of The Total Environment. 2015. Vol. 506. P. 394–402.
12. Ecotoxicology of Explosives / G. I. Sunahara, G. Lotufo, R. G. Kuperman, J. Hawari. Boca Raton : CRC Press, 2009. 352 p.
13. Jenkins T. F., Hewitt A. D., Grant C. L. Spatial heterogeneity of energetics and propellants on training ranges. Hanover : US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 2006. 32 p. (ERDC/CRREL TR-06-11).
14. A case study of contaminants on military ranges: Camp Edwards, Massachusetts, USA / J. Clausen, J. Robb, D. Curry, N. Korte. Environmental Pollution. 2004. Vol. 129, № 1. P. 13–21.
15. Akhavan J. The Chemistry of Explosives. 3rd ed. Cambridge : Royal Society of Chemistry, 2011. 200 p.
16. Cooper P. W. Explosives Engineering. New York : Wiley-VCH, 1996. 480 p.
17. Kubota N. Propellants and Explosives: Thermochemical Aspects of Combustion. 3rd ed. Weinheim : Wiley-VCH, 2015. 556 p.
18. Sutton G. P., Biblarz O. Rocket Propulsion Elements. 9th ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2016. 792 p.
19. Technical guidance for military Munitions response actions / U.S. Army Corps of Engineers. 2013. URL: https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_200-1-15.pdf (дата звернення: 08.04.2026).
20. TM 9-1300-214 Military Explosives / Department of the Army Technical Manual. 1984. URL: https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-03/documents/9546041.pdf (дата звернення: 08.04.2026).
21. Вибухова справа: навч. посіб. / Навчальний центр оперативно-рятувальної служби цивільного захисту ДСНС України. Київ, 2013. 156 с.

Дата першого надходження статті до видання: 09.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 628.5:631.4
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.3

РЕСУРСНИЙ ПОТЕНЦІАЛ МІНЕРАЛЬНОЇ ПУЛЬПИ У ВІДНОВЛЕННІ РОДЮЧОСТІ АНТРОПОГЕННО ЗМІНЕНИХ ҐРУНТІВ

Сікач Т.І., Колодій М.А., Алпатова О.М., Кравчук-Ободзінська Т.В., Булковська А.Г.
Державний університет «Житомирська політехніка»
вул. Чуднівська, 103, 10005, м. Житомир
kpn_vti@ztu.edu.ua, kgt_kma@ztu.edu.ua, ke_aom@ztu.edu.ua,
ke_ktv@ztu.edu.ua, tzns45_bag@student.ztu.edu.ua

У статті досліджено вплив дрібнодисперсної пульпи каменеобробних підприємств на ріст і розвиток рослин у контексті раціонального використання промислових відходів та зниження антропогенного навантаження на навколишнє середовище. Актуальність роботи зумовлена значними обсягами утворення відходів каменеобробки в Житомирській області та необхідністю їх ефективної утилізації в межах принципів циркулярної економіки. Метою дослідження є оцінка фітотоксичного та біостимулюючого впливу пульпи на рослини, а також визначення перспектив її використання для рекультивації порушених земель. Експериментальні дослідження проводили в лабораторних умовах із використанням як тест-об'єкта вівса звичайного (Avena sativa L.). Як субстрати застосовано піщаний та дерново-підзолистий ґрунти, що відрізняються фізико-хімічними властивостями. Пульпу вносили у концентраціях 5, 10, 20 та 50 % від маси ґрунту. Оцінку впливу здійснювали за морфометричними показниками рослин (довжина стебла, кореня, фітомаса) та розрахунком фітотоксичного ефекту. Встановлено, що дія пульпи має нелінійний характер і залежить від її концентрації та типу ґрунту. Найбільш інтенсивний стимулюючий ефект зафіксовано при концентрації 20 % на піщаному субстраті, де спостерігається істотне покращення водоутримуючої здатності та забезпечення рослин доступними мінеральними елементами. Водночас за концентрації 50 % відзначено зниження позитивного ефекту та появу ознак пригнічення росту, що пояснюється погіршенням аерації та ущільненням субстрату. Отримані результати свідчать про доцільність більш поглибленого вивчення перспектив використання дрібнодисперсної пульпи як меліоранта для покращення властивостей малородючих ґрунтів та рекультивації деградованих територій. Практичне значення роботи полягає в обґрунтуванні безпечних концентрацій внесення пульпи (до 20 %), що дозволяє поєднати утилізацію відходів із підвищенням продуктивності рослин. Результати дослідження можуть бути використані у природоохоронній практиці, агроекології та при розробленні регіональних стратегій сталого розвитку. *Ключові слова:* пульпа каменеобробки, фітотоксичність, субстрат, біорекультивація земель, біостимулюючий ефект, морфометричні показники рослин.

Resource Potential of Mineral Pulp in Restoring Fertility of Anthropogenically Altered Soils. Sikach T., Kolodii M., Alpatova O., Kravchuk-Obodzinska T., Bulkovska A.
The article investigates the effect of fine-grained pulp from stone-processing enterprises on plant growth and development in the context of rational use of industrial waste and reduction of anthropogenic pressure on the environment. The relevance of the study is determined by the significant volumes of stone-processing waste generated in the Zhytomyr region and the need for its efficient utilization within the principles of a circular economy. The aim of the study is to assess the phytotoxic and biostimulatory effects of pulp on plants and to determine the prospects for its use in the reclamation of degraded lands. Experimental research was conducted under laboratory conditions using common oat (Avena sativa L.) as a test object. Sand and sod-podzolic soils, differing in physicochemical properties, were used as substrates. The pulp was applied at concentrations of 5, 10, 20, and 50 % of the soil mass. The effect was evaluated based on morphometric parameters of plants (stem length, root length, and biomass) and calculation of the phytotoxic effect. It was established that the action of the pulp has a non-linear character and depends on its concentration and soil type. The most pronounced stimulatory effect was observed at a 20 % concentration on the sandy substrate, where a significant improvement in water retention and supply of accessible mineral elements to plants was recorded. At the same time, at a 50 % concentration, the positive effect decreased, and signs of growth inhibition appeared, which is explained by reduced aeration and compaction of the substrate. The results indicate the feasibility of further in-depth studies on the potential use of fine-grained pulp as a soil ameliorant to improve the properties of low-fertility soils and reclaim degraded areas. The practical significance of the study lies in substantiating safe pulp application rates (up to 20 %), which allows combining waste utilization with increased plant productivity. The findings can be applied in environmental management, agroecology, and the development of regional sustainable development strategies. *Key words:* stone-processing pulp, phytotoxicity, substrate, land bioreclamation, biostimulatory effect, plant morphometric parameters.

Постановка проблеми. За кількістю каменеобробних підприємств лідером в Україні є Житомирська область. Сприятлива геологічна будова регіону забезпечує наявність численних родовищ природного каменю, що зумовило високу концентрацію різних підприємств з обробки каменю, які генерують значні обсяги відходів. За оцінками, щорічний обсяг відходів, що включають також дрібнодисперсні залишки каменю (пульпу), в регіоні сягає близько 50 тис. м³ [4-5]. З огляду на це, раціо-

© Сікач Т.І., Колодій М.А., Алпатова О.М., Кравчук-Ободзінська Т.В., Булковська А.Г., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

нальне використання відходів каменеобробки є актуальним та дозволить в подальшому зменшити антропогенне навантаження на довкілля та забезпечити ефективне використання природних ресурсів.

Властивості пульпи викликають особливий інтерес, адже при її внесенні до ґрунту зміняться його фізико-хімічні властивості, що вплинуть на ріст рослин. Необхідно встановити, чи проявляє пульпа негативний фітотоксичний ефект, пригнічуючи розвиток рослин, чи, навпаки, її дія може бути стимулюючою, сприяючи їхньому росту [1-3]. Визначення характеру цього впливу є важливим для розробки методик рекультивації забруднених ґрунтів, що дозволить повернути земельні ділянки у сільськогосподарський оборот та сприятиме сталому розвитку регіону й України в цілому [6].

Актуальність дослідження. В останні роки зростає увага до раціонального використання промислових відходів, зокрема пульпи. Хоча зазвичай її розглядають як сировину для будівельних матеріалів, важливо дослідити цей ресурс як потенційний засіб для підвищення родючості ґрунтів, рекультивації порушених земель та зменшення екологічного навантаження [4-7]. Мета дослідження полягає в оцінці впливу пульпи на ріст рослин, що дозволить визначити її користь або ризики для агроекологічного середовища, а також розробити рекомендації щодо її безпечного застосування.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. З огляду на високу концентрацію каменеобробних підприємств у Житомирській області, результати дослідження мають регіональне значення, оскільки сприятимуть розробленню ефективних рішень щодо поводження з відходами у межах місцевих програм сталого розвитку. Отримані дані можуть бути використані підприємствами галузі, органами місцевого самоврядування та агроекологічними службами для підвищення ефективності управління відходами і скорочення площ полігонів техногенних відкладів. Тому, авторський доробок відповідає завданням екологічної модернізації виробництв, розвитку сталого природокористування та переходу до циркулярної моделі економіки, де відходи розглядаються як ресурс для подальшого використання у виробничих або природних системах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних наукових працях проблема поводження з відходами каменеобробної промисловості розглядається у контексті переходу до моделі циркулярної економіки, яка ґрунтується на принципах повторного використання ресурсів, мінімізації утворення відходів і замикання матеріальних потоків. Відповідно до цих принципів, відходи каменеобробки, зокрема дрібнодисперсна пульпа, розглядаються не лише як екологічна проблема, а як потенційний вторинний ресурс для будівельної галузі або відходи, що потребують утилізації.

У роботах вітчизняних дослідників підкреслюється [4-6], що відходи каменеобробки становлять вагомий компонент мінеральних техногенних ресурсів України, які при належному управлінні можуть бути повернуті в господарський обіг. Автори зазначають, що реалізація принципів циркулярної економіки вимагає оцінки хімічного складу, фракційного складу та екологічної безпечності таких відходів перед їх повторним використанням.

Подібні підходи демонструють і зарубіжні дослідження [1-2], у яких відходи гірничо-видобувної або будівельної промисловості розглядаються як альтернатива природним матеріалам у ґрунтових та будівельних системах, а їхнє застосування аналізується через методологію оцінки життєвого циклу.

Наукові публікації також звертають увагу на екологічні та агрономічні ризики від повторного використання мінеральних залишків. Зокрема, зазначається необхідність перевірки їхньої фітотоксичності, вмісту важких металів, впливу на кислотність і структуру ґрунту. Водночас окремі експериментальні роботи демонструють позитивний ефект внесення дрібнодисперсних мінеральних матеріалів на структурування ґрунтів**,** покращення вологоутримуючої здатності та стимулювання росту рослин за умови контролю концентрацій.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Попри наявність окремих досліджень, комплексна оцінка впливу пульпи каменеобробки на агроекологічні показники залишається недостатньо вивченою. Відсутні узагальнені дані про її дію на різні культури, зміну фізико-хімічних параметрів ґрунту та потенціал використання у системах біорекультивації**.** Це створює потребу у проведенні комплексних експериментів, які поєднуватимуть біологічну, хімічну та екологічну оцінку, що відповідає завданням сталого розвитку та впровадженню принципів циркулярної економіки в Україні.

Новизна. Фокусування дослідження на впливі пульпи на ріст рослин, дозволить розробити рекомендації щодо рекультивації земель та оцінити перспективи безпечного застосування таких відходів в цих цілях у майбутньому.

Методологічне або загальнонаукове значення. Даний напрямок досліджень підсилить міждисциплінарний підхід: геологія (регіональні родовища), технологія (каменеобробка), агроекологія (рослини, ґрунт), екологія (вплив відходів) та несе загальнонауковий характер.

Викладення основного матеріалу. Дослідження проводили в лабораторних умовах при температурі 22°С. Як модельну рослину використовували овес звичайний (*Avena sativa L.*). Овес є невибагливою однорічною культурою, який можна використовувати як сидерат, що покращить структуру ґрунту. Завдяки розвиненій стрижневій кореневій системі овес звичайний сприяє дренуванню, структуру-

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

ванню ґрунту та накопиченню органічних сполук, що робить її зручною для оцінки фітотоксичності.

Для досліду було використано два типи ґрунтів з різними фізико-хімічними властивостями (таблиця 1). Такий вибір обумовлений домінуванням дерново-підзолистих ґрунтів на Житомирщині, а також оголення піщаного шару під час добувних робіт відкритим способом.

Отже, зроблений вибір дозволяє встановити різницю у впливі пульпи на ґрунти з різним гранулометричним складом, кислотністю та буферною здатністю, а також оцінити потенційну придатність таких субстратів для подальшої рекультивації або утилізації відходів каменеобробки.

У ґрунтові зразки вносили дрібнодисперсну пульпу в концентраціях 5, 10, 20 та 50 % від маси

Таблиця 1

Обґрунтування вибору ґрунтів для внесення відходів каменеобробки (пульпи)

Різновид ґрунту	Характеристика	Обґрунтування вибору
Піщаний ґрунт	Легкий за гранулометричним складом, малородючий, з низьким вмістом органічної речовини, добре аерується, має високу водопроникність.	Низька буферна здатність дозволяє чітко виявити зміни під дією пульпи. Висока фільтраційна здатність сприяє дослідженню міграції компонентів пульпи у профілі ґрунту. Типовий для зон розташування каменеобробних підприємств, тому є природно релевантним для дослідження.
Дерново-підзолистий ґрунт	Кислий, малогумусний, легкий за складом, типовий для Полісся.	Поширений у регіонах розміщення каменеобробних підприємств (зокрема Житомирщина). Кисла реакція середовища дозволяє оцінити потенціал пульпи як лужного меліоранта. Низький вміст глинистих часток сприяє виявленню структурних змін під дією пульпи.

ґрунту [8-9]. Підготовлені зразки розміщували в пластикові ємності з дренажними отворами. Для кожного варіанта досліду проводили три повторності. Посів овесу звичайного здійснювали рівномірно по поверхні зволоженого субстрату. Полив проводили відстояною водопровідною водою у міру підсихання ґрунту, підтримуючи помірну вологість, оптимальну для росту рослин.

Ґрунтоутворювальні властивості дрібнодисперсної пульпи викликають значний науковий інтерес. Внесення її в ґрунт призведе до трансформації його фізико-хімічних параметрів та впливу на фізіологічні процеси рослин. Тому у роботі зосередили свою увагу на фітотоксичності пульпи.

Фітотоксичний ефект розраховують за формулою:

$$ФЕ = \frac{B_0 - B_x}{B_0} \times 100\%,$$

де B_0 – морфометричні характеристики рослин у контрольному варіанті; B_x – морфометричні характеристики рослин у досліджуваних зразках [7].

На рис. 1 представлено узагальнену оцінку фітотоксичного ефекту пульпи каменеобробки за відсотковими від'ємними значеннями на ріст рослин, що вказує на біостимулюючий ефект, тобто пульпа містить елементи та створює середовище, що покращують живлення, підвищують активність ферментів та стимулюють ріст.

Графічне представлення результатів (рис. 2-4) демонструє, як дрібнодисперсна пульпа впливає на морфометричні показники рослин. Зокрема, при використанні пульпи у концентраціях 5 % та 20 % на обох досліджуваних субстратах спостерігається стимулюючий ефект, а саме збільшення довжини стебла та кореня, а також зростання фітомаси рослин (відповідно 1:2, 1:1,5, 1:2). При концентраціях пульпи 10 % та 50 % на піщаному субстраті суттєвих змін порівняно з контролем не зафіксовано. Проте, на дерново-підзолистому ґрунті при 10 % концентрації пульпи виявлено пригнічення ростових процесів. Натомість, за 50 % концентрації пульпи на дерново-підзолистому субстраті спостерігається стимуляція зростання.

Фітотоксичний ефект дрібнодисперсної пульпи проявляється по-різному і визначається її концентрацією в субстраті, а також дослідженими морфометричними показниками (рис. 5-6). На рисунку 5 чітко простежується зона максимального стимулюючого ефекту при концентрації 20%. Приріст фітомаси (ФЕ = -139,86 %) та лінійних розмірів кореневої системи (ФЕ = -124,17 %) свідчить про високу адаптивну здатність вівса до даного мінерального субстрату. Точка перелому спостерігається при 50% концентрації, де графік переходить у додатну зону (зону пригнічення), що маркує межу безпечного використання відходу».

Згідно з побудованим графіком (рис. 6) визначено зони фітотоксичного впливу при концентрації домішки 5 % та 50 % (для кореня 3,2 % та 26,2 %), та 10 % (для фітомаси 40,0 %). Отримані результати свідчать про активацію захисних механізмів, що забезпечують виживання рослин у складних умо-



Рис. 1. Інтерпретації ростостимулюючої активності пульпи за показниками фітотестування

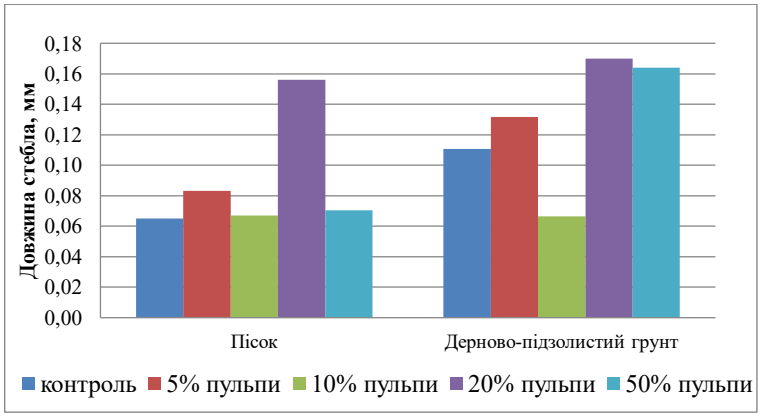


Рис. 2. Динаміка морфометричних показників стебла Avena sativa L. залежно від вмісту дрібнодисперсної пульпи каменеобробки.

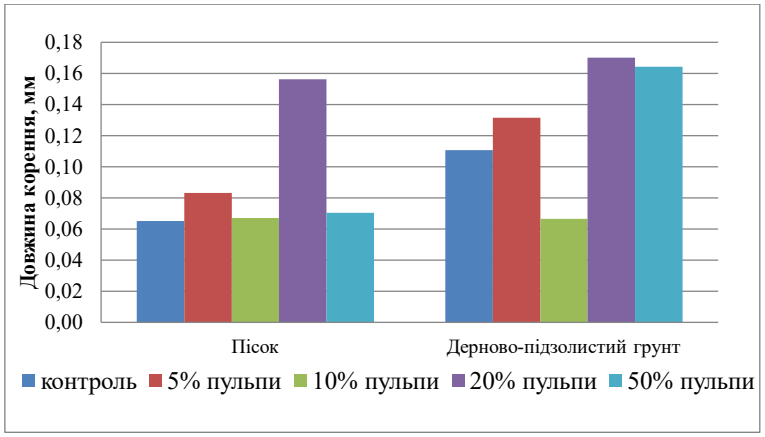


Рис. 3. Динаміка морфометричних показників кореневої системи Avena sativa L. залежно від вмісту дрібнодисперсної пульпи каменеобробки

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

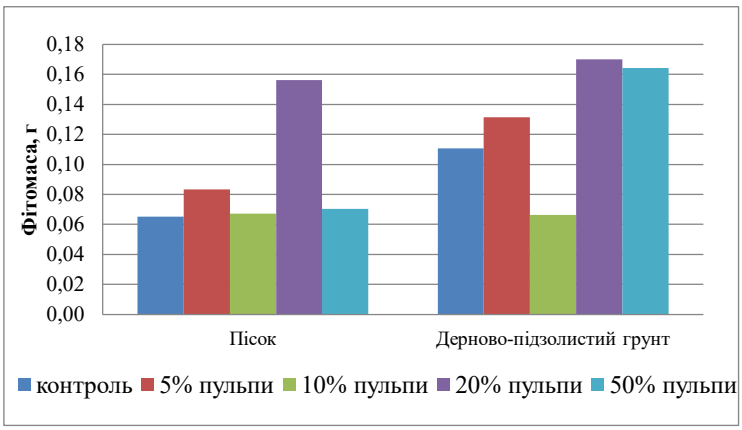


Рис. 4. Динаміка морфометричних показників фітомаси Avena sativa L. залежно від вмісту дрібнодисперсної пульпи каменеобробки

вах. Це виявляється в прискоренні зростання стебла чи кореня, незважаючи на загальний стресовий стан.

Водночас за концентрації пульпи 20% спостерігається зміщення реакції у бік стимуляції ростових процесів (від біологічної варіації до дуже сильного біостимулюючого ефекту (ФЕ кореня -0,1 %, стебла -3,6 %, фітомаси -53,7 %)), залежно від аналізованого показника. Така реакція пов'язана із частковою компенсацією негативного впливу за рахунок надходження елементів живлення, що тимчасово переважає токсичну дію.

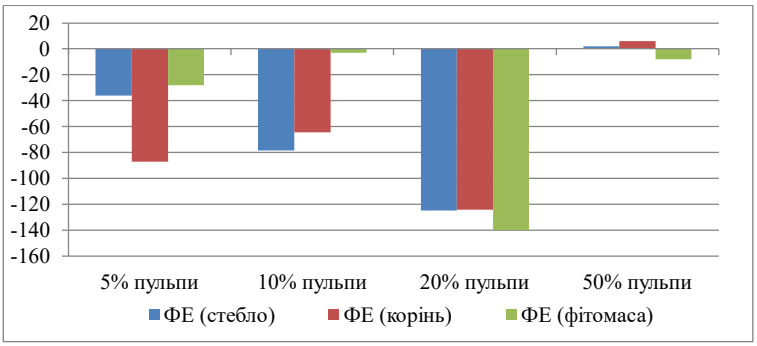


Рис. 5. Показники фітотоксичного ефекту (ФЕ) дрібнодисперсної пульпи на піщаному субстраті

Примітка: Додатні значення вказують на пригнічення росту, від'ємні значення – на стимуляцію (позитивний вплив) порівняно з контролем.

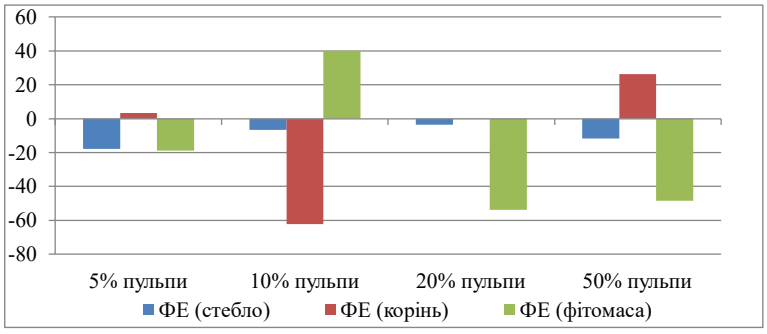


Рис. 6. Показники фітотоксичного ефекту (ФЕ) дрібнодисперсної пульпи на дерново-підзолистому субстраті

Примітка: Додатні значення вказують на пригнічення росту, від'ємні значення – на стимуляцію (позитивний вплив) порівняно з контролем.

Найбільш помітним результатом дослідження є виявлення зони стимуляції росту, що математично виражаються через від'ємні значення фітотоксичного ефекту (ФЕ). У біології це свідчить про стимуляцію росту.

На піску при внесенні 20 % пульпи довжина стебла зросла на 124 % порівняно з контролем. Це пояснюється тим, що чистий пісок є бідним на поживні речовини субстратом, а пульпа каменеобробки (гранітна/габброва) містить мінеральні солі, мікро- та макроелементи (калій, магній, кальцій, залізо), які стають доступними для рослин, такий позитивний відгук зумовлений поступовою трансформацією агрофізичних та біохімічних властивостей піску під впливом мінеральної пульпи, що схематично зображено на рис. 7.

Отримані результати на дерново-підзолистих ґрунтах свідчать про нелінійний характер впливу мінеральної пульпи, де поєднання поживного та токсичного ефектів зумовлює різні варіації реакцій рослин залежно від концентрації. Це пов'язано з тим, що даний тип ґрунту характеризується наяв-



Рис. 7. Трансформація агрофізичних та біохімічних властивостей піску під впливом мінеральної пульпи

ністю сформованої поживної бази, унаслідок чого внесення мінеральної пульпи забезпечує менший відносний приріст біомаси.

Дрібнодисперсна пульпа виконує роль «структуратора» для піску. Пісок занадто швидко пропускає воду. Дрібні частинки пульпи заповнюють пори, підвищуючи вологоємність субстрату. Це дозволяє вівсу (Avena sativa L.) краще розвивати кореневу систему, що ми бачимо у значному прирості довжини кореня на піщаних сумішах (до 119,5 мм проти 53,3 мм у контролі).

Дані показують (рис. 5), що при досягненні концентрації 50 % стимулюючий ефект різко знижується, а на піску навіть з'являється слабкий позитивний ФЕ (1,8 % для стебла та 6,0 % для кореня).

При такій високій концентрації починає діяти фактор «замулювання». Надмірна кількість дрібних часток перекриває доступ кисню до коріння (погіршується аерація) та може механічно ущільнювати субстрат, що уповільнює ріст.

Таким чином, що пісок реагує на пульпу як на «добриво» та «покращувач структури», демонструючи вибуховий ріст біомаси при 20% концентрації (збільшення фітомаси у понад 2 рази: з 0,065 г до 0,156 г), що зумовлено її мінеральним складом, покращенням аерації субстрату та активізацією біологічних процесів.

Для дерново-підзолистих ґрунтів пульпа працює як буфер. Цікаво, що при 10 % концентрації спостерігається певне зниження фітомаси (ФЕ = 40%), що може бути пов'язано з тимчасовим порушенням хімічного балансу або зміною кислотності (pH), проте при 20 % система стабілізується. Є доцільність дослідити, які зміни відбуватимуться при концентрації пульпи 15 та 25%.

Головні висновки. У результаті проведеного лабораторного дослідження впливу дрібнодисперсної пульпи каменеобробних підприємств на ріст і розвиток вівса звичайного (*Avena sativa L.*) на двох типах субстратів (пісок та дерново-підзолистий ґрунт) встановлено наступне:

1. У діапазоні концентрацій від 5 % до 20 % дрібнодисперсна пульпа не виявляє пригнічувальної дії на тест-об'єкт. Навпаки, спостерігається стійкий ефект стимуляції росту, що підтверджується від'ємними значеннями показника фітотоксичного ефекту (ФЕ). Найбільш виражений позитивний вплив на морфометричні показники зафіксовано при внесенні 20 % пульпи від маси субстрату. На піщаних субстратах довжина стебла та кореня зросла на 124 % порівняно з контролем, а загальна фітомаса збільшилася більш ніж у 2 рази (з 0,065 г до 0,156 г). Це свідчить про те, що мінеральні частки пульпи виконують роль

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

джерела мікроелементів та покращують вологоємність бідних піщаних ґрунтів.

2. Встановлено, що дерново-підзолистий ґрунт виявляє вищу стійкість до внесення техногенної пульпи порівняно з піском. Приріст біомаси на цьому типі ґрунту був стабільним, але менш контрастним, що пояснюється наявністю власного поживного депо та розвиненою поглинальною здатністю ґрунтового комплексу.

3. Збільшення частки пульпи до 50 % призводить до нівелювання стимулюючого ефекту. Зокрема, на піщаному субстраті з'являються перші ознаки фітотоксичності (пригнічення росту стебла на 1,8 % та кореня на 6 %). Це зумовлено зміною фізичних властивостей субстрату – замулюванням пор, погіршенням аерації та механічним ущільненням, що обмежує розвиток кореневої системи.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані дані обґрунтовують доцільність використання відходів каменеобробки як меліорантів при відновленні порушених земель Житомирщини видобувною діяльністю. Застосування дрібнодисперсної пульпи у дозі до 20 % дозволяє ефективно утилізувати промислові відходи, одночасно стимулюючи розвиток фітоценозів на деградованих ділянках та піщаних відвалах кар'єрів.

Література

1. García-Robles H., Melloni E. G. P., Navarro F. B., et al. Gypsum mining spoil improves plant emergence and growth in soils polluted with potentially harmful elements. Plant and Soil. 2022. Vol. 481.P. 315-329. DOI: https://doi.org/10.1007/s11104-022-05639-3
2. Liu B., Chen X., Wu L., Chen M., Zhou K., Peng L. The reuse of pulp and paper mill sludge: as a soil amendment. *Proceedings of the 2015 International Forum on Energy, Environment Science and Materials*. DOI:10.2991/ifeesm-15.2015.226.
3. Onopriienko D., Makarova T., Hapich H., Chernysh Y., Roubík H. Agroecological Transformation in the Salt Composition of Soil under the Phosphogypsum Influence on Irrigated Lands in Ukraine. *Agriculture*, 2024, 14(3):408. DOI:10.3390/agriculture14030408.
4. Shamrai V. I., Korobiichuk V. V., Sobolevskyi R. V. Management of waste of stone processing in the framework of Euro integration of Ukraine. *Вісник ЖДТУ. Серія "Технічні науки"*, 2017, 1(2(80)), 234-239. DOI:10.26642/tn-2017-2(80)-234-239. DOI: https://doi.org/10.26642/tn-2017-2(80)-234-239
5. Башинський С.І., Блецко М.І., Панасюк А.В., Припотень Ю.К., Остафійчук Н.М. «Дослідження фізико-хімічних властивостей дрібнодисперсних відходів каменеобробних підприємств з метою визначення стратегії поведінки». Технічна інженерія, № 1(91), 2023, с. 271-279. DOI:10.26642/ten-2023-1(91)-271-279.
6. Мельник-Шамрай В. В., Шамрай В. І., Пацева І. Г., Ігнатюк Р. М. Оцінка впливу гірничо-видобувної галузі на довкілля: система управління відходами. Екологічні науки. 2024. № 4 (55). С. 164-168. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.4-55.26
7. Писаренко П. В., Диченко О. Ю., Цьова Ю. А., Середа М. С. Напрями біоремедіації техногенно забруднених ґрунтів. Таврійський науковий вісник. 2021. № 120. С. 282–292. DOI: 10.32851/2226-0099.2021.120.35.
8. Сікач Т. І., Шихненко К. О. Пульпа як вторинний ресурс: біоіндикаційна оцінка її впливу на продуктивність різних типів ґрунтів. Трансформаційні підходи до сталого розвитку: екологічна освіта, наука та природоохоронні практики для відбудови України : *зб. тез Міжнар. наук.-практ. конф. (22–26 верес. 2025 р., м. Житомир)*. Житомир: Житомирська політехніка, 2025. С. 198. URL: https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2025/10/198.pdf
9. Скиба Г., Шихненко К., Колодій М. Використання дрібнодисперсних відходів каменеобробної промисловості як інноваційне рішення для відновлення деградованих ґрунтів у регіональному розвитку. Регіональні дослідження України: інтеграція традицій і інновацій (до 30-річчя кафедри географії України): *матеріали Всеукр. наук. конф. (м. Київ, 30 трав. 2025 р.)*. Київ : ВПЦ «Київський університет», 2025. С. 138–145. URL: https://geo.knu.ua/wp-content/uploads/2025/06/regionalni-doslidzhennya_konf_2025_geografiyi-ukrayiny.pdf?utm_source=chatgpt.com

Дата першого надходження статті до видання: 02.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 556.504
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.4

ОЦІНКА ТЕХНОЄМНОСТІ ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ СТІЙКОСТІ ДНІПРА В УМОВАХ УРБАНІЗАЦІЇ (НА ПРИКЛАДІ М. КИЄВА)

Жукова О.Г., Старжинський П.С., Кордуба І.Б., Прокопенко І.О.
Київський національний університет будівництва та архітектури
пр. Повітряних Сил, 31, 03037, м. Київ
pavlostarzhynskyi@gmail.com

Наукова праця присвячена комплексній оцінці техноємності та екологічної стійкості Київської ділянки р. Дніпро, яка функціонує під інтенсивним антропогенним тиском і розглядається як репрезентативна модель урбанізованого градієнта. Мета роботи – кількісне визначення меж екологічної стійкості водного середовища шляхом інтегральної оцінки гідрохімічних і гідробіологічних показників (2017–2024 рр.) та виявлення локальних ділянок виснаження екологічного резерву річкової екосистеми.

Для об'єктивної оцінки впливу на річкову екосистему сформовано ієрархічний просторовий урбан-градієнт із трьох зон: фонова ділянка вище міста (км 922–897), транзитна зона міського ядра (км 897–854,5) та зона контролю асиміляції нижче міста (до км 825).

Для узагальнення багатопараметричного масиву даних застосовано індекс забрудненості води (ІЗВ) та індекс техноємності (ІТЄ) [2, 3]. Оцінку самоочисної здатності виконано за інтенсивністю внутрішньоводоймних процесів (ІІВП) шляхом розрахунку коефіцієнта ефективності (Е) – співвідношення повного біохімічного та хімічного споживання кисню [5].

За даними 2024 року, на фоновій ділянці та вході в місто якість води відповідала ІІІ класу («помірно забруднена»), тоді як у замикаючому створі (км 854,5) ІЗВ стрімко зріс до 2,70 (IV клас, «забруднена»). Головними чинниками деградації визначено азот амонійний (середнє значення 1,056 мг N/дм³, перевищення нормативів у 2,7 раза), фосфати та надлишкове органічне навантаження ($БСК_5$, ХСК). На цій ділянці зафіксовано виснаження індексу техноємності (ІТЄ) та критичне зниження коефіцієнта ефективності до рівня Е = 0,117, що свідчить про втрату резистентності екосистеми.

Отримані висновки повністю узгоджуються з реакцією біотичних компонентів: зниженням видового різноманіття та епізодами розвитку потенційно токсичних ціанобактерій *(Microcystis aeruginosa)*. Запропонована система інтегральних індикаторів може бути впроваджена у практику екологічного менеджменту для обґрунтування планів управління річковими басейнами та пріоритизації водоохоронних заходів у межах великих міст. *Ключові слова:* урбан-градієнт, індекс техноємності (ІТЄ), індекс забрудненості води (ІЗВ), інтенсивність внутрішньоводоймних процесів (ІІВП), коефіцієнт ефективності (Е), р. Дніпро, азот амонійний, $БСК_5$, ХСК, екологічна стійкість, біотичні компоненти.

Assessment of the techno-capacity and ecological resilience of the dnipro river under urbanisation (the case of Kyiv) Zhukova O., Starzhynskyi P., Korduba I., Prokopenko I.

This scientific work is devoted to a comprehensive assessment of the technological capacity and environmental sustainability of the Kyiv section of the Dnipro River, which operates under intense anthropogenic pressure and is considered a representative model of an urbanised gradient. The aim of this work is to quantitatively determine the limits of the aquatic environment's ecological stability through an integral assessment of hydrochemical and hydrobiological indicators (2017–2024) and to identify local areas where the ecological reserve of the river ecosystem is depleted.

For an objective assessment of the impact on the river ecosystem, a hierarchical spatial urban gradient of three zones was established: a background section upstream of the city (km 922–897), a transit zone of the urban core (km 897–854.5), and an assimilation control zone downstream of the city (down to km 825).

To synthesise the multi-parameter data array, the Water Pollution Index (WPI) and the Techno-Capacity Index (TCI) were applied [2, 3]. The self-purification capacity was assessed based on the intensity of in-waterbody processes (IIWP) by calculating the efficiency coefficient (E) – the ratio of ultimate biochemical oxygen demand to chemical oxygen demand [5].

According to 2024 data, the water quality in the background section and at the entrance to the city corresponded to Class III ("moderately polluted"), whereas at the outlet cross-section (km 854.5), the WPI rapidly increased to 2.70 (Class IV, "polluted"). Ammonium nitrogen (average value 1.056 mg N/dm³, exceeding the standards by 2.7 times), phosphates, and excessive organic load (BOD_5, COD) were identified as the primary drivers of degradation. In this section, a depletion of the techno-capacity index (TCI) and a critical decrease in the efficiency coefficient to E = 0.117 were recorded, indicating a loss of ecosystem resistance.

These findings are fully consistent with the response of biotic components: a decrease in species diversity and episodes of potentially toxic cyanobacteria (*Microcystis aeruginosa*) blooms. The proposed system of integral indicators can be implemented in environmental management practices to substantiate river basin management plans and prioritise water protection measures within large cities. *Key words:* urban gradient, techno-capacity index (TCI), water pollution index (WPI), intensity of intra-reservoir processes (IIRP), efficiency coefficient (E), Dnipro River, ammonium nitrogen, BOD_5, COD, ecological stability, biotic components.

© Жукова О.Г., Старжинський П.С., Кордуба І.Б., Прокопенко І.О., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

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

Постановка проблеми у загальному вигляді. Київський профіль р. Дніпро (км 922–825) функціонує у досить складних гідроморфологічних та гідрохімічних умовах. Річка одночасно приймає зворотні води агломерації та дифузний стік з урбанізованого водозбору, а в межах системи водосховищ (Київського та Канівського) з уповільненим водообміном це зумовлює інтенсивне накопичення органіки й біогенних елементів, збільшуючи ризики евтрофування [11–14]. Специфіка екологічної ситуації цієї ділянки полягає у значній просторовій нерівномірності гідрохімічних показників уздовж всього урбанізованого профілю. Формується складна система зон критичного техногенного тиску та відрізків часткового відновлення. За традиційного моніторингу, що спирається на обмежену кількість розрізнених пунктів, така мозаїка часто відтворюється неповно. Через це складно обґрунтувати критичні межі допустимого антропогенного навантаження та вчасно ідентифікувати ділянки, де природний потенціал самовідновлення є виснаженим [12, 13]. Важливо, що гідрохімічні зсуви мають чітке біотичне підтвердження: стан біотичних угруповань на замикаючому створі міської ділянки (нижче Бортницької станції аерації) слугує незалежним індикатором верифікації просторового урбан-градієнта, оскільки біота фіксує не лише миттєву зміну концентрацій, а й кумулятивну реакцію екосистеми на хронічний стрес [6, 7].

Актуальність дослідження. Оцінювання стану великих зарегульованих річкових систем у межах міських агломерацій потребує категоричного переходу від простої констатації перевищень гранично допустимих концентрацій (ГДК) за окремими показниками до використання інтегральних метрик. Такі метрики в поєднанні з просторовим (урбанізаційним) градієнтом дають змогу відобразити об'єктивний стан водного середовища за схемою «вище міста – міське ядро – нижче міста». Особливо потреба в такому розподілі посилюється в умовах кліматичних змін, таких як маловодні періоди та температурні екстремуми, коли самоочисна здатність водного середовища різко знижується. У контексті впровадження підходів Водної рамкової директиви ЄС в Україні вкрай актуальними є інструменти, які дозволяють кількісно оцінювати екологічну стійкість та відновлювальний потенціал масивів поверхневих вод на основі об'єктивних індикаторів [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасній науковій літературі урбанізаційний вплив на річкові системи розглядається як поєднання змін водообміну, зростання органічного та біогенного навантаження і порушення структур біоти. Для великих річок у межах мегаполісів визначальними є не лише обсяги скидів, а й просторова організація пунктів спостережень, що забезпечує зіставність даних уздовж урбанізаційного профілю. Для управлінської інтерпретації багатопараметричних гідрохімічних масивів доцільним є застосування індексних підходів і поєднання їх із біотичними індикаторами. Теоретичну основу для визначення меж екологічної витривалості формують концепції техноємності та стійкості геосистем до антропогенних навантажень [10, 12–16].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Робота інтегрована у виконання завдань Плану управління річковим басейном Дніпра на 2025–2030 роки та безпосередньо орієнтована на інформаційну підтримку управлінських рішень у водогосподарському комплексі міста . Запропонований ієрархічний просторовий дизайн моніторингу забезпечує наукове обґрунтування конфігурації спостережень: чітке відокремлення базового фону на вході в агломерацію від глибоких трансформацій у межах міського ядра та зони асиміляції скидів нижче міста. Оцінка техноємності як індикатора межі допустимого навантаження має пряме прикладне значення для оптимізації систем водовідведення та екологічного супроводу модернізації очисної інфраструктури міста [10, 11].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Попри наявність розгалуженої мережі моніторингових спостережень, у вітчизняній практиці недостатньо опрацьованим залишається питання комплексного поєднання в межах єдиної методології: ієрархічного просторового дизайну створів для характеристики безперервного урбанізаційного профілю; інтегральної індексної інтерпретації гідрохімічних даних, чутливої до поздовжніх градієнтів; а також зв'язку просторових зсувів якості води з кількісними характеристиками техноємності, самоочисної здатності та їхньої подальшої верифікації за відгуком біоти на виході з міського ядра [8–12, 14–17].

Мета і завдання дослідження. Мета роботи – кількісна оцінка техноємності та екологічної стійкості р. Дніпро на Київській ділянці (км 922–825) за даними 2017–2024 рр. шляхом інтегральної індексної інтерпретації гідрохімічного моніторингу. Завдання включали: обґрунтування ієрархічного просторового дизайну п'яти створів вздовж урбанізаційного градієнта; просторово-часовий аналіз динаміки кисневого режиму та біогенного навантаження; оцінку ІЗВ, ІТЄ та ІІВП із локалізацією зон виснаження асиміляційного резерву; верифікацію результатів за відгуком біотичних угруповань [8, 9].

Наукова новизна. Запропоновано методичний підхід до оцінювання екологічного стану зарегульованих річкових систем в умовах урбанізаційного тиску, що поєднує ієрархічний просторовий дизайн моніторингових створів з інтегральними індексами техноємності (ІТЄ), забрудненості води (ІЗВ) та інтенсивності внутрішньоводоймних процесів (ІІВП). Просторова диференціація якості води вздовж профілю км 922–825 дозволила об'єктивно розмежувати вплив фонового стоку, міського ядра та зони асиміляції скидів.

Для Київської ділянки р. Дніпро отримано систематичний восьмирічний ряд (2017–2024 рр.) значень ІТЄ та ІІВП із верифікацією за біотичним відгуком на замикаючому створі, що дозволило кількісно зафіксувати прогресуюче виснаження асиміляційного резерву екосистеми в умовах хронічного антропогенного стресу.

Методологічне та загальнонаукове значення. Методологічне значення результатів дослідження полягає у розробці та апробації алгоритму інтегрованого оцінювання стану річкових систем, що поєднує методику ієрархічного просторового дизайну (урбанізаційного градієнта) з розрахунком чутливих до техногенного навантаження індексів. Цей підхід може бути масштабований для моніторингу інших транскордонних та регульованих річок, що зазнають значного міського впливу.

Загальнонаукове значення роботи обумовлене розширенням уявлень про межі екологічної стійкості та механізми формування техноємності великих водних артерій у сучасних умовах. Отримані результати поглиблюють теоретичну базу для вивчення «синдрому міського потоку» та сприяють розумінню процесів трансформації речовин у каскадних водних екосистемах під впливом хронічного антропогенного стресу.

Виклад основного матеріалу. Матеріали і методи. Дослідження проведено на Київській ділянці р. Дніпро (профіль км 922–825). Просторовий дизайн моніторингової мережі (рис.1) побудовано за принципом урбанізаційного градієнта з виділенням трьох ключових ділянок: «вище міста» (вхідна фонова зона, км 922–897); «центр міста» (зона транзиту міського ядра, км 897–854,5 зі створом контролю на км 870) та «нижче міста» (зона відтоку та впливу Бортницької станції аерації, км 854,5–825). Для уточнення градієнта забруднення в районі БСА додатково залучено створи км 855,5 та 855,0.

Інтегральна оцінка стану екосистеми здійснювалася шляхом розрахунку трьох індексів за стандартизованими гідрохімічними показниками [3, 4, 6].

Індекс забрудненості води (ІЗВ) [3, 4] розраховується як середнє арифметичне відношень фактичних концентрацій до нормативних значень для шести показників, що найбільше визначають якість води (розчинений кисень – обернене відношення, $БСК_5$, ХСК, NH_4^+–N, NO_2^-–N, PO_4^{3-}–P):

$$ІЗВ = 1/n \sum (C_i / ГДК_i), \quad (1)$$

де: C_i – середня концентрація і-го показника за розрахунковий період, мг/дм³; $ГДК_i$ – гранично допустима концентрація і-го показника, мг/дм³; n – кількість нормованих показників (n = 6).

Для розчиненого кисню використовується обернене відношення: $ГДК_i / C_i$.

Індекс техноємності (ІТЄ) відображає ступінь вичерпання асиміляційного потенціалу водного середовища та розраховується як відношення повного біохімічного споживання кисню до хімічного споживання кисню:

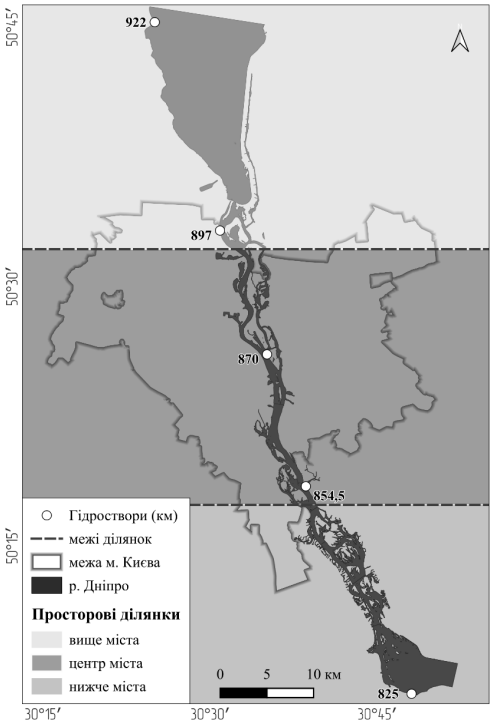


Рис. 1. Схема розташування гідрологічних створів, представлених у вигляді урбанізаційного градієнта на Київській ділянці р. Дніпро (км 922–825)

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

$$ІТЄ = БСК_{повн} / ХСК = (БСК_5 \cdot 1{,}43) / ХСК, \quad (2)$$

де: $БСК_{повн}$ – повне біохімічне споживання кисню (мг O_2/дм³), розраховане через гідрохімічний коефіцієнт 1,43 від п'яти добового показника $БСК_5$; ХСК – хімічне споживання кисню (мг O_2/дм³) [6].

Значення ІТЄ наближається до 1,0 у міру виснаження асиміляційного резерву; критичним вважається перевищення порогу 0,70.

Індекс інтенсивності внутрішньоводоймних процесів (ІІВП) та коефіцієнт ефективності самоочищення (Е) характеризує інтенсивність внутрішньоводоймних біохімічних перетворень у водному середовищі. Для практичної інтерпретації самоочисної здатності використано коефіцієнт ефективності (Е), який чисельно збігається з розрахунком ІТЄ (БСКповн/ХСК), але інтерпретується за шкалою рівнів самоочищення (низький/середній/високий) [6].

$$Е = БСК_{повн} / ХСК, \quad (3)$$

Розподіл значень Е здійснюється за трьома рівнями: низький (Е = 0–0,35) – переважання хімічних процесів окиснення, пригнічення біоти; середній (Е = 0,36–0,70) – задовільна інтенсивність внутрішньоводоймних процесів; високий (Е = 0,71–1,0) – активні процеси біохімічного самоочищення.

Аналіз гідрохімічних показників р. Дніпро на Київській ділянці за 2024 рік (Таблиця 1) засвідчує чітку просторову диференціацію якості води вздовж урбанізаційного профілю. На фоновому створі (км 922) середнє значення роз-

Таблиця 1

Статистичні показники гідрохімічного стану води р. Дніпро (Київська ділянка), 01.01.2024–30.11.2024

Показники	Статистичний параметр	Гідростворі				
		км 922 *n=11*	км 897 *n=10*	км 870 *n=10*	км 854,5 *n=10*	км 825 *n=11*
O_2 (розч.), мг O_2/дм³	середнє	9,33	7,92	7,91	8,53	7,94
	максимум	14,24	12,20	14,60	12,20	12,30
	мінімум	4,64	3,68	3,52	4,80	5,76
Cl^-, мг/дм³	середнє	20,41	19,05	16,84	19,76	18,54
	максимум	30,10	25,50	23,70	26,30	24,80
	мінімум	15,30	12,10	9,94	14,90	13,50
SO_4^{2-}, мг/дм³	середнє	39,72	39,76	36,24	35,89	37,55
	максимум	57,50	55,00	49,90	46,80	53,60
	мінімум	20,70	20,30	18,50	18,70	24,10
HCO_3^-, мг/дм³	середнє	181,5	179,3	198,0	203,0	194,5
	максимум	209,0	210,0	224,0	240,0	235,0
	мінімум	150,0	133,0	180,0	174,0	157,0
ХСК, мг O_2/дм³	середнє	51,75	43,68	44,11	45,95	46,66
	максимум	83,30	74,50	72,50	69,70	62,70
	мінімум	18,20	19,20	22,20	24,30	22,70
$БСК_5$, мг O_2/дм³	середнє	3,665	3,184	3,274	3,768	3,142
	максимум	5,280	6,560	5,860	7,360	5,280
	мінімум	2,080	1,280	1,120	2,240	2,080
NH_4^+-N, мг N/дм³	середнє	0,718	0,680	0,586	1,056	0,592
	максимум	1,630	1,830	1,600	2,810	2,170
	мінімум	0,310	0,250	0,240	0,400	0,110
NO_2^--N, мг N/дм³	середнє	0,028	0,025	0,024	0,080	0,027
	максимум	0,091	0,055	0,042	0,255	0,067
	мінімум	0,008	0,009	0,010	0,034	0,014
NO_3^--N, мг N/дм³	середнє	0,186	0,178	0,214	0,614	0,245
	максимум	0,350	0,340	0,410	2,410	0,690
	мінімум	0,080	0,100	0,080	0,140	0,050
PO_4^{3-}-P, мг P/дм³	середнє	0,081	0,105	0,122	0,222	0,107
	максимум	0,159	0,184	0,196	0,381	0,207
	мінімум	0,017	0,050	0,039	0,150	0,037

Примітки: *n* – кількість спостережень за період на гідростворі.

чиненого кисню становило 9,33 мг O_2/дм³, тоді як на вході в місто (км 897) та у зоні міського ядра (км 870) воно знизилось до 7,92–7,91 мг O_2/дм³. Найбільше органічне та біогенне навантаження зафіксовано на замикаючому створі км 854,5: ХСК – 45,95 мг O_2/дм³, $БСК_5$ – 3,768 мг O_2/дм³, азот амонійний – 1,056 мг N/дм³ (перевищення нормативу у 2,7 рази), нітрати – 0,614 мг N/дм³, фосфати – 0,222 мг P/дм³. У зоні асиміляції нижче міста (км 825) ці показники частково нормалізуються, що свідчить про відновлення самоочисних процесів.

Динаміка ІЗВ за 2017–2024 рр. (Рис. 2) демонструє стабільно несприятливий стан зони міського ядра [3, 4]. Упродовж 2017–2023 рр. створи км 870 та км 854,5 стабільно відповідали IV класу («забруднена», ІЗВ = 2,6–3,4), тоді як фонові та контрольні створи (км 922, км 897, км 825) утримувались у межах III класу («помірно забруднена», ІЗВ = 1,8–2,3). У 2024 р. зафіксовано помітне покращення на створі км 870 – ІЗВ знизився до 2,15 (III клас), що свідчить про часткове самоочищення у транзитній зоні. Водночас км 854,5 залишився у IV класі (ІЗВ = 2,85), підтверджуючи хронічну деградацію замикаючого створу міської ділянки.

Індекс техноємності (ІТЄ) та індекс інтенсивності внутрішньо-водоймних процесів (ІІВП) [6] (Рис. 3а, 3б) фіксують максимальне навантаження на екосистему у зонах км 870 і км 854,5. Значення ІТЄ на цих створах у 2017–2024 рр. коливалися

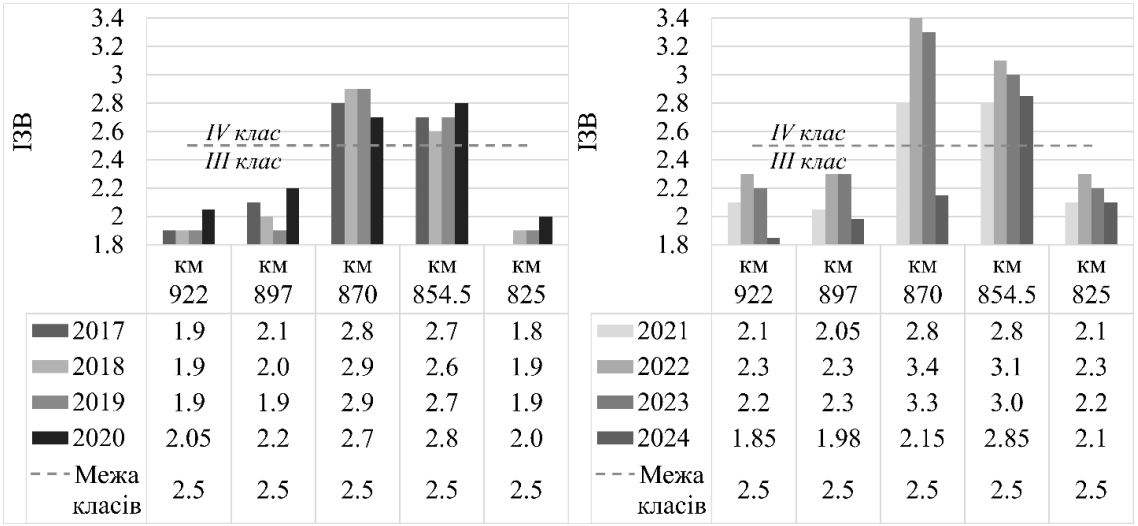
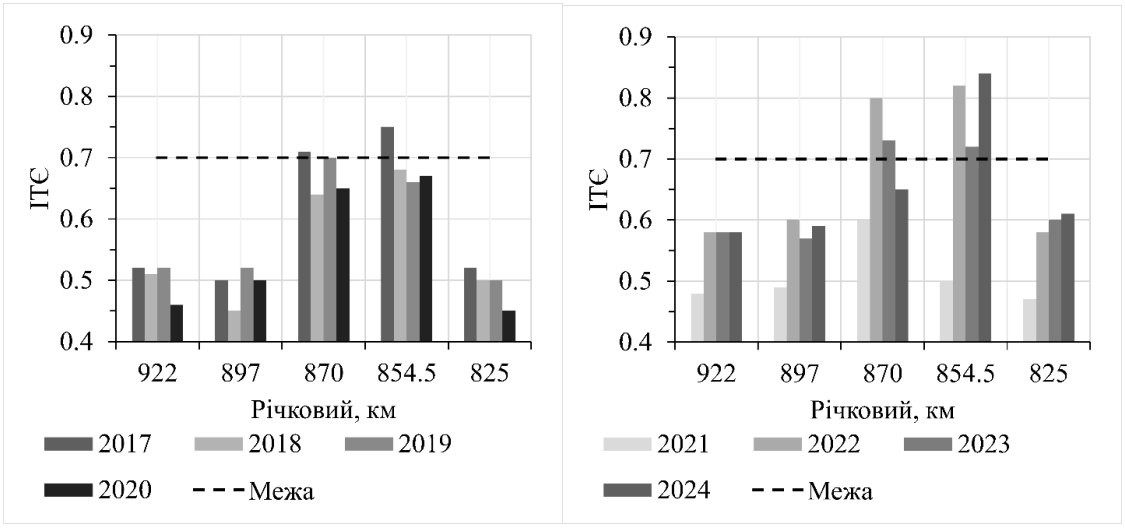
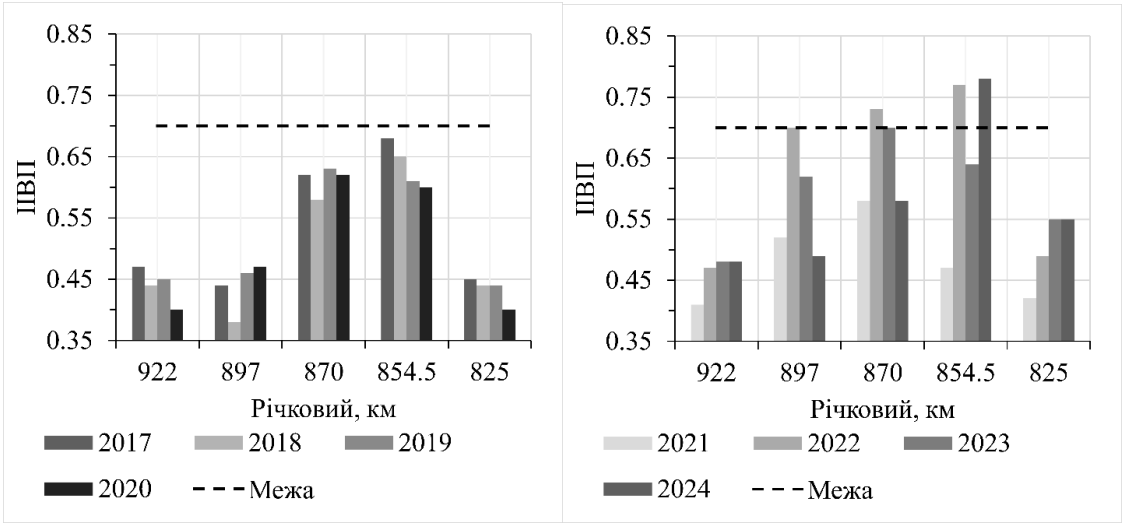


Рис. 2. Оцінка якості води за індексом забрудненості води (ІЗВ), р. Дніпро (Київська ділянка), 2017–2024 рр.



а)

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



б)

Рис. 3. Динаміка ІТЄ (а) та ІВП (б) р. Дніпро (Київська ділянка), 2017–2024 рр. [6]

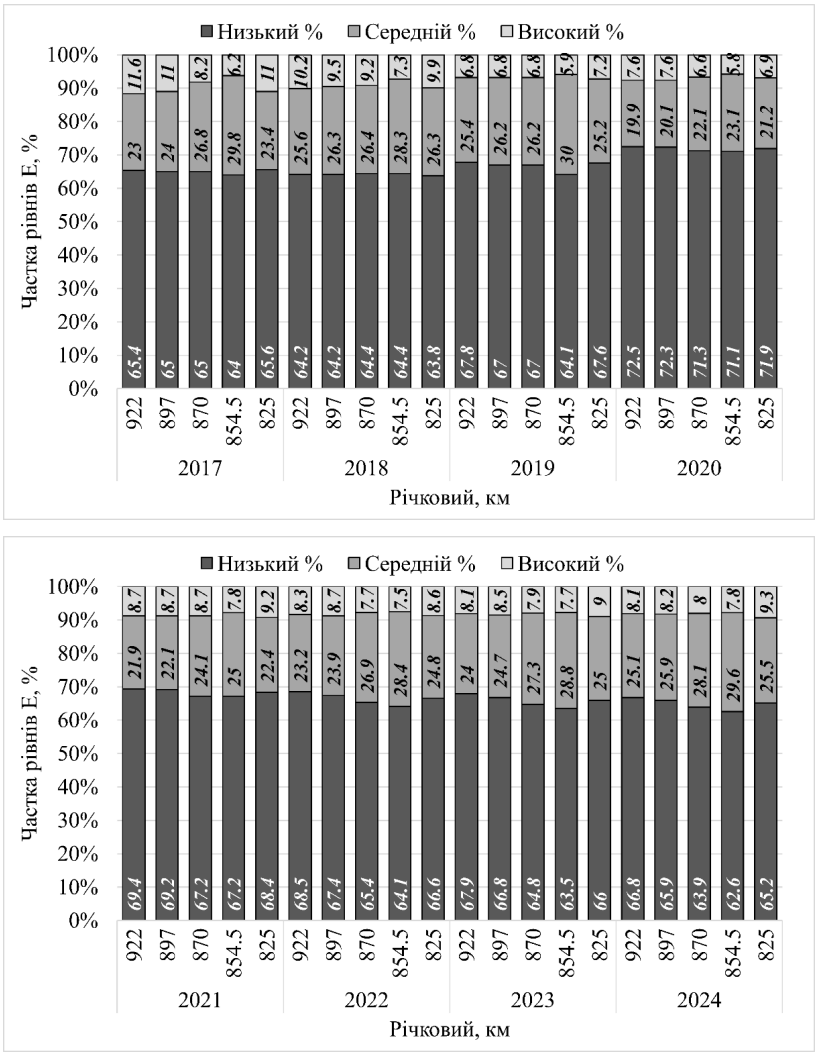


Рис. 4. Розподіл коефіцієнта ефективності самоочищення (Е), р. Дніпро (Київська ділянка), 2017–2024 рр. [6]

Таблиця 2.1

Узагальнені гідробіологічні показники оцінки стану р. Дніпро в межах міста Києва, 2017–2023 рр

Показник	Гідростворі		
	км 897	км 870	км 854,5
Сапробний індекс	0,950	1,300	0,800
Чисельність фітопланктону (10^6 клітин/м³)	678,0	56,00	272,0
Біомаса (мг/м³)	1072,0	11,00	368,0
Кількість видів	12	8	7
Сапрофітні бактерії, (клітин/м³)	сотні–тисячі ($10^2 – 10^3$)	десятки–сотні тисяч ($10^4 – 10^5$)	сотні тисяч–мільйони ($10^5 – 10^6$+)
Індекс структурної самоорганізації	0,740	1,400	0,790
Індекс Шеннона (біомаса)	5,920	4,300	3,610

Таблиця 2.2

Гідробіологічні показники р. Дніпро в межах м. Києва, 2021, 2023, 2024 рр

Показник	Гідростворі		
	км 855,5	км 855, (БСА)	км 854,5
2021р., червень			
Біомаса фітопл., г/м³	124,00	922,28	76,13
Дом. види фітопл.	*Gomphonema olivaceum*	*Microcystis pulverea*	-
Видів бентосу	18	5 (мінімум)	13
Стан	Задовільний	Локальне забруднення	Швидке самоочищення
2023 р., (липень – вересень)			
Біомаса фітопл., г/м³	3562,24	1538,14	6646,52
Дом. види фітопл.	*Melosira varians, Oscillatoria*	*Microcystis pulverea, Oscillatoria*	*Microcystis aeroginosa*
Видів бентосу	25	6 (Критично)	34
Стан	Цвітіння води (високий фон)	Токсичний вплив на дно	Гіперевтрофікація, вторинне забруд.
2024 р., серпень			
Біомаса фітопл., г/м³	2374,61	2767,15	1190,23
Дом. види фітопл.	*Microcystis aeroginosa*	*Microcystis aeroginosa*	*Microcystis, Oscillatoria*
Видів бентосу	26	22	34
Стан	Високий рівень цвітіння	Макс. біомаси, част. відновлення бентосу	Активне самоочищення

в діапазоні 0,60–0,84, при цьому у 2024 р. на км 854,5 зафіксовано новий максимум – ІТЄ = 0,84, що перевищує пік 2022 р. (0,82) та свідчить про подальше зростання техногенного навантаження. На фоновому (км 922) та нижньому (км 825) створах ІТЄ стабільно залишався на рівні 0,45–0,61, тобто в межах допустимого навантаження. Відповідно ІІВП у зоні міського ядра у 2024 р. досяг 0,78 на км 854,5 – найвищого значення за весь спостережний ряд, що відображає критичну інтенсифікацію деструктивних процесів і виснаження асиміляційного резерву.

Аналіз розподілу коефіцієнта ефективності самоочищення (Е) (Рис. 4) підтверджує: частка «низького» рівня самоочищення (Е = 0–0,35) на всіх створах стабільно перевищує 64–73%, тоді як «висока» здатність (Е > 0,71) фіксується лише у 6–12% спостережень. На замикаючому створі км 854,5 частка «високих» значень найменша протягом усього ряду (5,8–9,1%), що вказує на критичне виснаження буферного потенціалу саме цієї ділянки. Примітно, що у 2024 р. на створі км 897 частка «середніх» значень зросла до 31,2% – найвищий показник за весь ряд спостережень для цього створу, що може свідчити про локальне посилення органічного навантаження на вході в місто. Коефіцієнт ефективності самоочищення (Е) у 2024 р. на км 854,5 знизився до 0,117, що є індикатором втрати резистентності екосистеми.

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

Гідробіологічні дані (Таблиці 2.1 та 2.2) надають незалежне підтвердження хімічних змін. За 2017–2023 рр. на км 854,5 зафіксовано найнижче видове різноманіття фітопланктону (7 видів проти 12 на км 897) та мінімальний індекс Шеннона (3,61). У 2023 р. (липень–вересень) у зоні нижче Бортницької станції аерації (км 854,5) домінуючим видом стала Microcystis aeruginosa при біомасі 6646,52 г/м³ і критично низькій кількості видів бентосу (6). Це свідчить про гіперевтрофікацію та вторинне забруднення. У 2024 р. (серпень) на всіх трьох внутрішньоміських створах домінували ціанобактерії (Microcystis aeruginosa), при цьому на км 854,5 відмічено активне самоочищення зі збільшенням видів бентосу до 34, що вказує на поступове відновлення після пікового навантаження попереднього сезону.

Висновки. На Київській ділянці р. Дніпро (км 922–825) впродовж 2017–2024 рр. встановлено стійку просторову диференціацію якості води вздовж урбанізаційного градієнта: фонові та контрольні створи (км 922, км 897, км 825) стабільно відповідали III класу (ІЗВ = 1,8–2,3), тоді як зона міського ядра (км 870–854,5) хронічно утримувалась у межах IV класу («забруднена»).

У 2024 р. зафіксовано новий максимум техногенного навантаження на замикаючому створі км 854,5: ІТЄ = 0,84 та ІІВП = 0,78 – найвищі значення за увесь спостережний ряд, що свідчить про подальше виснаження асиміляційного резерву екосистеми попри часткове покращення ІЗВ на км 870 (зниження до III класу).

Коефіцієнт ефективності самоочищення (Е) на км 854,5 у 2024 р. становив 0,117, що відповідає «низькому» рівню і підтверджує пригнічення біохімічних процесів. Гідробіологічне підтвердження отримано через домінування Microcystis aeruginosa та критично низьку кількість видів бентосу (6) у 2023 р.

Запропонований комплекс індексів (ІЗВ, ІТЄ, ІІВП) у поєднанні з ієрархічним просторовим дизайном п'яти створів дозволив об'єктивно локалізувати ділянки виснаження екологічного резерву та верифікувати результати гідрохімічного аналізу біотичними даними.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати можуть бути використані органами державного екологічного моніторингу для оптимізації мережі спостережень на урбанізованих ділянках річок України та встановлення науково обґрунтованих нормативів техногенного навантаження. Запропонований методичний підхід може бути масштабований для оцінки стану інших зарегульованих річок та транскордонних водних об'єктів.

Перспективним напрямом є впровадження запропонованого алгоритму до системи автоматизованого екологічного моніторингу р. Дніпро з інтеграцією даних дистанційного зондування та гідрологічного моделювання для прогнозування сезонних змін асиміляційного резерву в умовах зростаючого урбанізаційного тиску та кліматичних змін.

Література

1. Директива 2000/60/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 23 жовтня 2000 року про встановлення рамок дій Співтовариства у сфері водної політики (консолідована версія). http://data.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj
2. Про затвердження Методики віднесення масиву поверхневих вод до одного з класів екологічного стану масиву поверхневих вод та 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 № 5 від 14.01.2019. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0127-19#Text (дата звернення: 16.02.2026).
3. Про затвердження Нормативів екологічної безпеки водних об’єктів, у т.ч. гранично допустимих концентрацій забруднюючих речовин для водних об’єктів, що використовуються для рибогосподарських потреб : наказ Міністерства екології та природних ресурсів України № 471 від 30.07.2012.
4. Гриценко А. В., Васенко О. Г., Верніченко Г. А. та ін. Методика екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями. Нормативний документ (проект). Харків : УкрНДІЕП, 2012. 37 с.
5. Сніжко С. І. Оцінка та прогнозування якості природних вод. Київ : Ніка-Центр, 2001. 264 с.
6. Удод В. М., Жукова О. Г. Регіонально-екологічний підхід до оцінки можливих наслідків забруднення басейну річки Кальміус. Хімія та технологія води. 2015. Вип. 37 (1). С. 93–99.
7. Вільдман І. Л. Наукові основи створення системи інтегральних біоценотичних методів контролю водних систем (на прикладі р. Інгулець) : автореф. дис. … канд. техн. наук : 21.06.01. Київ : КНУБА, 2016. 23 с.
8. Грубінко В. В. Системна оцінка метаболічних адаптацій гідробіонтів. Наукові записки Тернопільського державного педагогічного університету імені В. Гнатюка. Серія: Біологія. 2001. Вип. 4 (15). С. 36–39.
9. Кізілова Н. М., Ричак Н. Л., Руднєв Ю. І. Системно-динамічний підхід до контролю якості води на урбанізованих територіях. Системи обробки інформації. 2019. Вип. 4 (159). С. 87–92.
10. Гродзинський М. Д. Стійкість геосистем до антропогенних навантажень. Київ : Лікей, 1995. 233 с.
11. Самойленко В. М., Діброва І. О. Антропогенізація ландшафтів. Київ : Ніка-Центр, 2021. 256 с.
12. Iordache V., Petrovici A., Dinu C. Urban pressures on river ecosystems in Eastern Europe: A case study of Bucharest. Ecological Indicators. 2019. Vol. 103. P. 39–51. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.03.049.
13. Fletcher T. D. et al. Urban stormwater management in a changing climate. Water Research. 2021. Vol. 190. 116748. DOI: https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116748.
14. Global Report on Sanitation and Wastewater Management in Cities and Human Settlements. Nairobi: UN-Habitat, 2023. URL: https://unhabitat.org/global-report-on-sanitation-and-wastewater-management-in-cities-and-human-settlements (дата звернення: 16.02.2026).

15. Nowicka B., Lewicki M., Zalewski M. Integrated assessment of urban water quality in Warsaw: Identifying sources of nutrient pollution. Science of the Total Environment. 2021. Vol. 793. 148547. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148547.
16. Liu Y. et al. Urban runoff mitigation by nature-based solutions: A meta-analysis. Urban Water Journal. 2023. Vol. 20 (2). P. 112–124. DOI: https://doi.org/10.1080/1573062X.2022.2127014.
17. Farhadi R., Ziari K., Noroozi M. Sustainable urban design for stormwater management. Sustainable Urban Design. Singapore : Springer, 2024. P. 123–145. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-97-4924-9_9.
18. Artemov V., Kovalenko O., Mykhailenko V. Impact of war-related disruptions on urban water infrastructure: A case study of Kyiv. Environmental Science and Pollution Research. 2022. Vol. 29. P. 45678–45689. DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-022-19034-7.

Дата першого надходження статті до видання: 03.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 528.88:504.453
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.5

ДИСТАНЦІЙНА ОЦІНКА ТРОФІЧНОГО СТАНУ Р. ПІВДЕННИЙ БУГ З ВИКОРИСТАННЯМ ФІТОПЛАНКТОНУ ТА ВИЩОЇ ВОДНОЇ РОСЛИННОСТІ ЯК ІНДИКАТОРІВ АЗОТНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Латуша Д.Р., Максименко М.П., Шевченко В.О., Кватернюк С.М.
[1]Вінницький національний технічний університет
вул. Хмельницьке шосе, 95, 21021, м. Вінниця
dima.latusha27@gmail.com

Стаття присвячена розробці та впровадженню методології дистанційного моніторингу трофічного стану річки Південний Буг, що важливо для забезпечення екологічної безпеки України. В умовах інтенсивного антропогенного тиску, аграрного забруднення та кліматичних змін екосистема річки зазнає деградації через системну евтрофікацію. Особливої гостроти проблема набула в умовах війни, коли Південний Буг став критичним джерелом питного водопостачання для цілих регіонів. В основі дослідження лежить використання багатоспектральних супутникових даних місії Sentinel-2 (MSI) та хмарної платформи Google Earth Engine (GEE). Розроблено алгоритм автоматизованої обробки знімків, що включає маскування хмарності, ізоляцію водного дзеркала за допомогою індексу NDWI та розрахунок серії біооптичних індикаторів. Для оцінки короткострокового азотного навантаження використано індекс хлорофілу NDCI, а для аналізу тривалої евтрофікації – комплекс вегетаційних індексів макрофітів. Також застосовано модель індексу трофічного стану (TSI) Карлсона на основі спектральної комбінації ND34. Аналіз літньо-осінніх періодів 2019–2025 рр. виявив значну просторову гетерогенність забруднення. Дистанційно ідентифіковано локальні зони підвищеного екологічного ризику (так звані «гарячі точки»), зокрема в акваторії Сабарівського водосховища (м. Вінниця), де супутникові дані підтвердили наслідки екстремальних скидів азоту амонійного (до 14,35 мг/дм^3) та явищ гострої гіпоксії. Зафіксовано сукцесію фітоценозів: деградацію зануреної рослинності та її заміщення поверхневими ціанобактеріальними матами. Встановлено, що через зменшення стоку річка втрачає «ефект розведення», що провокує гіперевтрофікацію навіть за стабільних обсягів викидів. Запропонований підхід дозволяє оперативно виявляти несанкціоновані скиди та дифузне аграрне забруднення. Результати дослідження є необхідні для прийняття обґрунтованих управлінських рішень для досягнення «доброго» екологічного стану масиві поверхневих вод, що є головною екологічною ціллю Плану управління річковим басейном Південного Бугу. *Ключові слова:* дистанційне зондування, евтрофікація, азотне навантаження, фітопланктон, макрофіти, екологічний моніторинг.

Remote assessment of the trophic state of the Southern Bug River using phytoplankton and higher aquatic vegetation as indicators of nitrogen load. Latusha D., Maksymenko M., Shevchenko V., Kvaterniuk S.

This paper focuses on the development and implementation of a remote monitoring methodology for the trophic state of the Southern Bug River, which is crucial for ensuring Ukraine's ecological security. Under intense anthropogenic pressure, agricultural pollution, and climate change, the river's ecosystem is undergoing severe degradation driven by systemic eutrophication. This issue has become particularly acute amidst the ongoing war, as the Southern Bug has emerged as a critical drinking water source for entire regions. The study relies on multispectral satellite data from the Sentinel-2 (MSI) mission, processed within the Google Earth Engine (GEE) cloud platform. An automated image processing algorithm was developed, encompassing cloud masking, water body isolation using the Normalized Difference Water Index (NDWI), and the computation of a series of bio-optical indicators. The Normalized Difference Chlorophyll Index (NDCI) was employed to assess short-term nitrogen loading, while a suite of macrophyte vegetation indices – namely NDAVI, SAVI, and FAI – was utilized to analyze long-term eutrophication. Additionally, Carlson's Trophic State Index (TSI) model was applied based on the ND34 spectral combination. Spatiotemporal analysis of the summer-autumn periods from 2019 to 2025 revealed significant spatial heterogeneity in pollution levels. Local ecological risk "hotspots" were remotely identified, particularly within the Sabariv Reservoir (Vinnytsia), where satellite data corroborated the impacts of extreme ammonium nitrogen discharges (up to 14.35 mg/dm^3) and occurrences of severe hypoxia. Furthermore, phytocenosis succession was observed, characterized by the degradation of submerged vegetation and its subsequent replacement by surface cyanobacterial mats. The findings indicate that due to reduced river discharge, the waterbody is losing its "dilution effect," thereby triggering hypereutrophication even when pollutant discharge volumes remain stable. The proposed approach enables the rapid detection of unauthorized wastewater discharges and diffuse agricultural pollution. The study's results are essential for making evidence-based management decisions aimed at achieving "good" ecological status for surface water bodies, which constitutes the primary environmental objective of the Southern Bug River Basin Management Plan. *Key words:* remote sensing, eutrophication, nitrogen load, phytoplankton, macrophytes, environmental monitoring.

Постановка проблеми та актуальність дослідження. Річка Південний Буг – єдина велика водна артерія, басейн якої повністю розташований у межах України, що робить її стратегічним об'єктом національної водної безпеки. Проте внаслідок безпрецедентного антропогенного втручання гідрологічний режим річки зазнав докорінної трансформації: русло перетворено на каскад штучних

© Латуша Д.Р., Максименко М.П., Шевченко В.О., Кватернюк С.М., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

водосховищ, що призвело до уповільнення водообміну та втрати здатності екосистеми до самоочищення.

Головним рушієм екологічної деградації Південного Бугу є системна евтрофікація, спричинена надмірним надходженням азоту та фосфору з дифузних сільськогосподарських джерел та комунальних стоків. Надмірне надходження азоту ініціює ряд негативних біологічних реакцій, стимулюючи гіперпродукцію фітопланктону та надмірне заростання русла вищою водною рослинністю. Відмирання цієї органіки провокує критичне зниження рівня розчиненого кисню та заморні явища, що становить пряму загрозу для гідробіонтів та санітарно-епідеміологічної безпеки населення.

Ситуація критично загострилася в умовах глобальних кліматичних змін та наслідків військових дій. Внаслідок загального зменшення річкового стоку у літньо-осінній період екосистема Південного Бугу втрачає «ефект розведення». Питома концентрація нітратів та амонію у воді стрімко зростає, що створює ефект експоненційної гіперевтрофікації навіть за незмінних обсягів викидів.

Традиційні методи гідрохімічного моніторингу in situ забезпечують високу аналітичну точність, проте є ресурсомісткими, логістично складними і не здатні відобразити високу просторово-часову гетерогенність розподілу забруднювачів на значних акваторіях і вздовж усього русла. З огляду на це, технології супутникового дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) стали рентабельною та безальтернативною основою для безперервного моніторингу трофічного статусу внутрішніх водойм.

Попри наявність ґрунтовних праць із гідрохімії річки, комплексні дослідження її трофічного стану із застосуванням сучасних супутникових індексів (NDCI, FAI) та хмарних платформ залишаються фрагментарними. Це зумовлює гостру необхідність розробки інтегрованої методології дистанційного моніторингу, яка дозволить об'єктивно оцінювати трофічний стан річки та локалізувати джерела забруднення.

Мета роботи полягає у розробці методології дистанційної оцінки трофічного стану та рівня азотного навантаження на екосистему річки Південний Буг на основі супутникових даних Sentinel-2, використовуючи спектральні характеристики фітопланктону та вищої водної рослинності як біооптичних індикаторів.

Для досягнення мети дослідження використано такі методи: аналіз багатоспектральних супутникових даних місії Sentinel-2 (MSI) із використанням каналів «червоного краю»; автоматизована обробка масивів зображень та просторово-часовий геоінформаційний аналіз у хмарному середовищі Google Earth Engine; алгоритмічна попередня обробка (препроцесинг) супутникових даних, що включає піксельно-точне маскування хмарності за допомогою шару класифікації сцени (SCL), медіанне усереднення для вилучення оптичних артефактів та просторову ізоляцію водного дзеркала за допомогою нормалізованого різницевого водного індексу (NDWI); атмосферна корекція із застосуванням спеціалізованого процесора ACOLITE; біооптичне індексування для кількісної оцінки біомаси фітопланктону за допомогою нормалізованого різницевого індексу хлорофілу (NDCI); дистанційна ідентифікація вищої водної рослинності із застосуванням комплексу спеціалізованих вегетаційних індексів, таких як нормалізований різницевий індекс водної рослинності (NDAVI); моделювання трофічного індексу (TSI) Карлсона; просторовий аналіз для локалізації зон екологічного ризику, пов'язаних із точковими та дифузними джерелами забруднення.

Виклад основного матеріалу. Антропогенна евтрофікація, зумовлена надмірним надходженням біогенних елементів (насамперед азоту та фосфору) з аграрних угідь та комунальних стоків, є однією з найбільш критичних загроз для прісноводних екосистем у глобальному масштабі [1]. Надлишок нутрієнтів у поєднанні з підвищенням температури поверхневих вод провокує гіпертрофічний розвиток фітопланктону, зокрема шкідливе цвітіння ціанобактерій, та надмірне розростання макрофітів [2]. Ці процеси призводять до деградації якості води, формування гіпоксичних умов та заморів гідробіонтів [1, 3]. Внутрішні водойми та річки належать до оптично складних вод. Їх спектральні властивості формуються нелінійною взаємодією фітопланктону, загальної завислої речовини та забарвленої розчиненої органічної речовини [4]. Історично використання супутників із низькою просторовою роздільною здатністю (наприклад, Sentinel-3 OLCI з пікселем 300 м) обмежувало моніторинг лише великими озерами, залишаючи малі водойми та річкові русла поза увагою через так званий ефект суміжних пікселів [5]. Запуск місії Sentinel-2 (MSI) вирішив цю проблему, забезпечивши просторову роздільну здатність 10–20 метрів та наявність спектральних каналів у зоні «червоного краю» (Red-Edge), що є критично важливими для кількісної оцінки хлорофілу в забруднених водах [1].

Фітопланктон реагує на надходження азоту надзвичайно швидко, формуючи "цвітіння" протягом кількох днів після змиву добрив [6]. Хлорофіл a (Chl-a) традиційно використовується як кількісний маркер біомаси водоростей [7]. Сучасні дослідження доводять наявність стійких кореляцій між супутниковими індексами хлорофілу та концентрацією загального азоту у воді, що дозволяє використовувати їх як індикатори забруднення

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

нітрогенвмісними сполуками [1, 8]. Для оцінки біомаси в оптично складних водах найчастіше застосовується нормалізований різницевий індекс хлорофілу (NDCI), який використовує канал "червоного краю" (705 нм) для фіксації піку розсіювання клітинами та червоний канал (665 нм) для фіксації поглинання хлорофілом. Використання NDCI мінімізує вплив залишкових атмосферних ефектів та неорганічних домішок [1]. Також високу ефективність демонструють емпіричні відношення каналів (наприклад, комбінації зеленого, червоного та ближнього інфрачервоного), які добре корелюють із рівнем азоту [9].

На відміну від мікроводоростей, макрофіти є інтегральним індикатором, що відображає довгостроковий рівень забруднення [10]. Надлишкове азотне навантаження кардинально порушує характеристики макрофітів та баланс екосистеми: зниження прозорості води через цвітіння фітопланктону призводить до деградації занурених рослин та їх заміщення вільноплаваючими видами, які витягують нутрієнти з товщі води [11, 12]. Для дистанційної ідентифікації макрофітів розроблено специфічні алгоритми. Ґрунтозахисний вегетаційний індекс (SAVI) мінімізує вплив яскравості дна на мілководних ділянках, тоді як нормалізований різницевий індекс водної рослинності (NDAVI) використовує синій канал для кращого проникнення у товщу води при фіксації занурених рослин [13]. Для виявлення щільних поверхневих скупчень водоростей та плаваючих макрофітів, які сигналізують про екстремальне азотне збагачення, ефективно застосовується індекс плаваючих водоростей (FAI) [13, 14].

Для обробки масивів супутникових даних та реалізації біооптичних моделей використано хмарну платформу Google Earth Engine (GEE), що дозволяє здійснювати обчислення без необхідності локального завантаження петабайтів знімків [15]. Процес попередньої обробки (препроцесингу) є критичним етапом, оскільки відбивальна здатність водної поверхні є надзвичайно низькою і чутливою до атмосферних та просторових перешкод [15, 16].

Як базовий набір даних в алгоритмі використано колекцію COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED, яка містить багатоспектральні знімки Sentinel-2 рівня обробки Level-2A [17]. Ці дані являють собою відбивальну здатність на рівні земної поверхні, яка вже пройшла попередню атмосферну корекцію за допомогою стандартного процесора Sen2Cor [17]. Для подальшого аналізу алгоритм залишає виключно "чисті" пікселі: рослинність, відкритий ґрунт та воду. Для вилучення впливу короткочасних артефактів на поверхні річки, таких як вітрове хвилювання або сонячні відблиски, використовується медіанне усереднення [18].

Останнім етапом препроцесингу є просторова ізоляція водного дзеркала Південного Бугу від прилеглих урбанізованих територій та берегових лісів [19]. Для цього застосовується нормалізований різницевий водний індекс (NDWI). Його фізичний зміст базується на високому відбиванні світла водою у зеленому діапазоні (Band 3, 560 нм) та майже повному його поглинанні у ближньому інфрачервоному діапазоні (Band 8, 842 нм) [19]. Формула індексу NDWI має такий вигляд:

$$NDWI = \frac{Band3 - Band8}{Band3 + Band8}. \quad (1)$$

У алгоритмі створюється бінарна маска акваторії із застосуванням жорсткого порогу NDWI > 0,05. Використання значення 0,05 дозволяє надійно відсікти перехідні зони, вилучаючи з розрахунків вологі берегові ґрунти та мілководні мулисті ділянки.

У результаті застосування цього конвеєра обробки формується ізольований масив "чистих" водних пікселів річки Південний Буг, який слугує надійною базою для подальшого розрахунку біооптичних індексів фітопланктону (NDCI) та макрофітів (NDAVI, FAI) [13]. Приклад виділення зон масового цвітіння водоростей у акваторії Сабарівського водосховища та розрухунку біооптичних індексів з використанням GEE наведено на рис.1.

Води річки Південний Буг класифікуються як оптично складні води, де інтенсивне поглинання світла забарвленою розчиненою органічною речовиною та розсіювання неорганічними завісями у синьому і зеленому діапазонах знижує ефективність традиційних алгоритмів [4]. Алгоритм NDCI обчислюється як нормалізоване відношення між сигнальним каналом B5 (705 нм), що фіксує інтенсивний пік клітинного розсіювання та флуоресценції фітопланктону, та референсним каналом B4 (665 нм), який відповідає зоні максимального поглинання світла хлорофілом a [1]:

$$NDCI = \frac{Band5 - Band4}{Band5 + Band4}. \quad (2)$$

Аналіз був зосереджений на літньо-осінньому меженному періоді (червень – вересень), оскільки саме за умов високих температур та зниження швидкості водообміну наслідки азотного збагачення проявляються найбільш екстремально [20].

Просторовий аналіз просторового розподілу NDCI дозволяє здійснювати екологічний моніторинг з роздільною здатністю до 20 метрів [1]. Позитивні та стрімко зростаючі показники NDCI безпосередньо корелюють з експоненційним зростанням біомаси фітопланктону та вказують на високу ймовірність формування токсичних ціанобактеріальних матів [17].

Динаміка NDCI у Південному Бузі слугує маркером походження забруднення (рис.2). Локалізовані "гарячі точки" з аномально високими значеннями

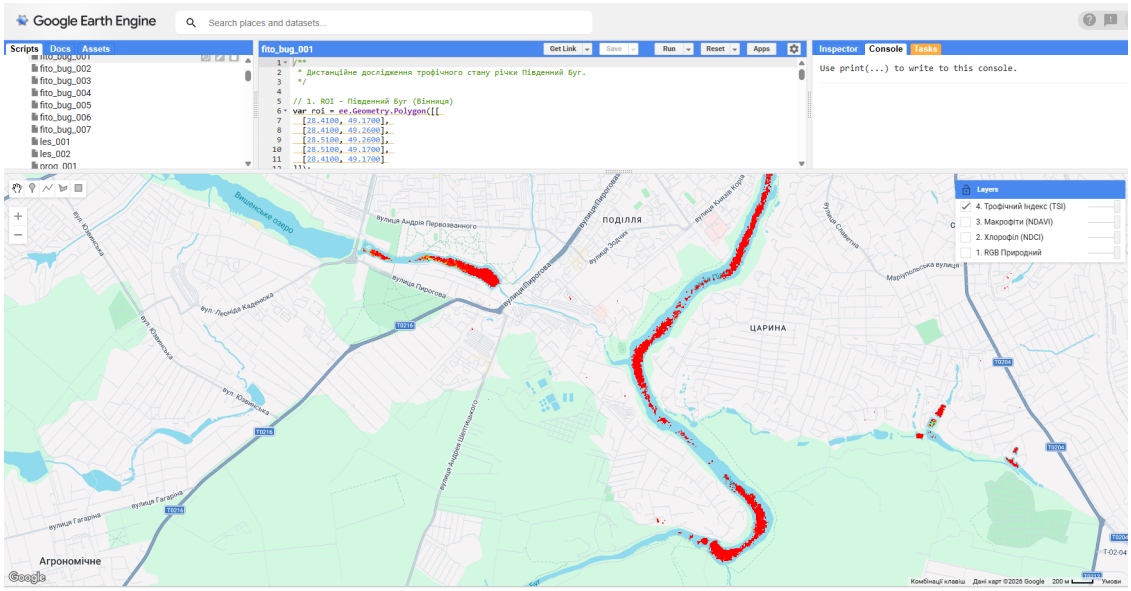


Рис. 1. Виділення зон масового цвітіння водоростей у акваторії Сабарівського водосховища

NDCI, зафіксовані безпосередньо нижче за течією від промислових об'єктів або міських очисних споруд, є прямими індикаторами точкових скидів неочищених стічних вод [21]. Натомість, масштабні зони інтенсивного "цвітіння", що просторово збігаються з великими сільськогосподарськими масивами у середній течії річки, відображають наслідки масивного поверхневого змиву нітратів (дифузне азотне забруднення) [22].

Це дозволяє не лише кількісно оцінювати ступінь гіперевтрофікації, але й об'єктивно локалізувати первинні джерела та шляхи міграції азотного навантаження в масштабах усього річкового басейну, що є необхідним для формування превентивних стратегій водного менеджменту [22].

Вища водна рослинність (макрофіти) демонструє довгострокові, інтегральні відповіді екосистеми на зміну трофічного статусу та накопичення біогенних елементів у донних відкладеннях [23]. При надлишковому азотному навантаженні на екосистему Південного Бугу відбувається кардинальне порушення балансу фітоценозів: екстремальне "цвітіння" води різко знижує її прозорість, що призводить до деградації та загибелі укорінених занурених макрофітів через нестачу світла. Звільнену екологічну нішу займають вільноплаваючі макрофіти та поверхневі ціанобактеріальні мати, здатні витягувати нутрієнти безпосередньо з товщі води [24].

Дистанційна ідентифікація макрофітів у річкових умовах ускладнюється тим, що водне середовище суттєво поглинає та розсіює сигнал у ближньому інфрачервоному (NIR) діапазоні спектра [25]. З метою прецизійного картування вищої водної рослинності в оптично складних водах річки Південний Буг на основі багатоспектральних даних Sentinel-2 було застосовано комплекс спеціалізованих вегетаційних індексів. Зокрема, для

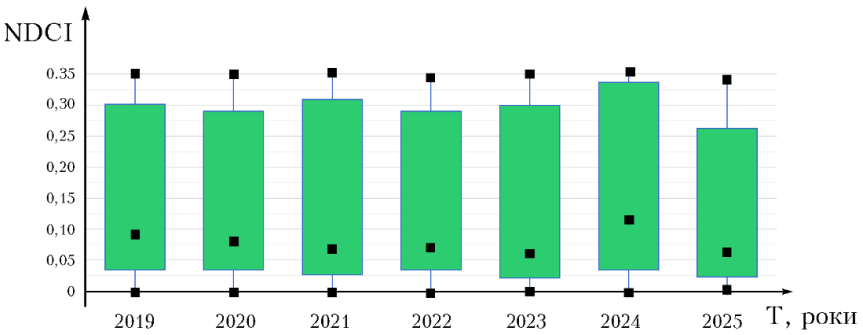


Рис. 2. Діаграма розмаху для нормалізованого різницевий індексу хлорофілу у літній період

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

ідентифікації та просторового картування занурених макрофітів (підводних луків) застосовано нормалізований різницевий індекс водної рослинності (NDAVI). На відміну від класичних індексів наземної рослинності, в алгоритмі NDAVI червоний спектральний канал, який характеризується високим коефіцієнтом загасання у воді, замінено на синій канал (Band 2 місії Sentinel-2, центральна довжина хвилі 490 нм) [17]:

$$NDAVI = \frac{Band8 - Band2}{Band8 + Band}. \quad (3)$$

де $Band8$ – відбиття у ближньому інфрачервоному діапазоні (842 нм),

$Band2$ – відбиття у синьому діапазоні (490 нм).

На мілководних річкових ділянках Південного Бугу дно або густі мінеральні зависи можуть проглядатися крізь товщу води і спотворювати корисний сигнал рослинності, через що традиційний індекс NDVI часто дає нестабільні результати [26, 27]. Індекс SAVI мінімізує вплив "яскравості дна" (субстрату) завдяки введенню емпіричного поправочного коефіцієнта:

$$SAVI = \frac{Band8 - Band4}{Band8 + Band4 + L} \times (1 + L), \quad (4)$$

де $Band4$ – відбиття у червоному діапазоні (665 нм),

L – коригувальний коефіцієнт яскравості фону (у даному дослідженні L = 0,428, що є оптимальним для мілководних умов) [26, 27].

Індекс плаваючих водоростей (FAI) використовується для детектування таких проявів евтрофікації, як щільні поверхневі скупчення плаваючих макрофітів (наприклад, ряски) та ціанобактеріальних матів [14]. Він базується на відніманні сигналу базової лінії (NIR') від сигналу у смузі 8 ближнього інфрачервоного діапазону [14]:

$$FAI = Band8_{NIR} - NIR'. \quad (5)$$

де сигнал базової лінії розраховується як:

$$NIR' = Band4_{Red} + (Band11_{SWIR} - Band4_{Red}) \times \frac{\lambda_{NIR} - \lambda_{Red}}{\lambda_{SWIR} - \lambda_{Red}}, \quad (6)$$

де $\lambda_{Red\,4} = 664{,}6$ нм, $\lambda_{NIR\,8} = 832{,}8$ нм, $\lambda_{SWIR\,11} = 1613{,}7$ нм – центральні довжини хвиль для відповідних каналів Sentinel-2: Band 4, Band 8 та Band 11.

Просторове картування та аналіз цих індексів у GEE дозволяє створити автоматизовані карти сукцесії фітоценозів [14]. Зони русла Південного Бугу, що характеризуються високими значеннями FAI та одночасною зменшенням показників NDAVI і SAVI, є ділянками із найбільш критичним, довгостроковим забрудненням нітрогенвмісними сполуками.

Комплексна оцінка екологічного здоров'я та якості води Південного Бугу вимагає переходу від аналізу окремих параметрів до використання інтегральних показників. Традиційний у гідроекології є індекс трофічного стану (Trophic State Index – TSI) за Карлсоном, який в умовах інтенсивного азотного та фосфорного навантаження відображає ступінь евтрофікації водойми. Для оцінки TSI у середовищі GEE використано спектральний індекс ND34 [28] зелений спектральний канал (Band 3, 560 нм) відображає локальний мінімум поглинання світла хлорофілом та високе розсіювання у товщі води, тоді як червоний канал (Band 4, 665 нм) відповідає зоні максимального поглинання фотосинтетичним пігментом:

$$ND34 = \frac{Band3 - Band4}{Band3 + Band4}, \quad (7)$$

де $Band3$ та $Band4$ – значення відбивальної здатності у зеленому та червоному каналах супутника Sentinel-2.

Сучасні дослідження демонструють сильну лінійну кореляцію (R^2 = 0.86) між значеннями індексу ND34 та показниками індексу TSI, отриманими на основі вимірювань прозорості [28]:

$$TSI = S \cdot ND34 + I. \quad (8)$$

Для прісноводних систем встановлені такі емпіричні коефіцієнти – S = -819,4, а I = 245,5). Хоча ці коефіцієнти можуть потребувати локального калібрування для окремих ділянок Південного Бугу,

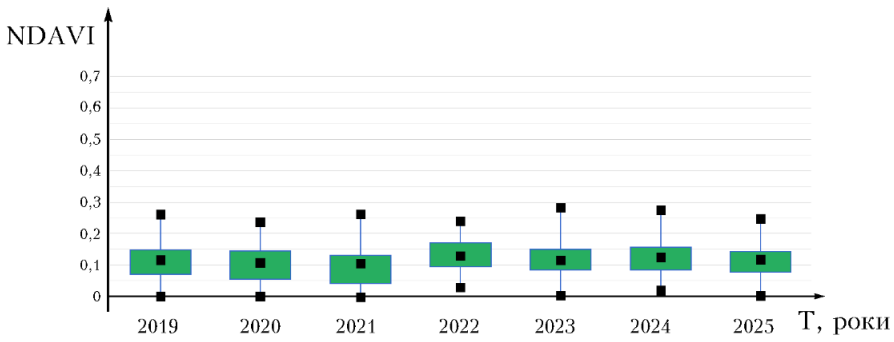


Рис. 3. Діаграма розмаху для нормалізованого різницевого індексу водної рослинності у літній період

загальний підхід дозволяє отримувати точні просторові карти класифікації якості води з похибкою менше 17%.

На основі розрахованих дистанційно значень TSI здійснюється піксельна класифікація акваторії за наступною екологічною шкалою [28]:

– TSI < 40 (оліготрофний стан). Прозорість за диском Секкі понад 4,0 м. Чиста вода з низьким азотним навантаженням.

– TSI 41-50 (мезотрофний стан). Прозорість 2,0 – 3,9 м. Помірне збагачення біогенними елементами, проміжна стадія екосистеми.

– TSI 51-60 (евтрофний стан). Прозорість 1,0 – 1,9 м. Високий вміст сполук азоту та фосфору (N/P), що супроводжується частими "цвітіннями" фітопланктону та початком деградації екосистеми.

– TSI > 60 (гіперевтрофний стан). Прозорість менше 0,9 м. Стан критичного азотного забруднення, який характеризується суцільним розвитком ціанобактерій та макрофітів, жорсткою гіпоксією і максимальним екологічним ризиком.

Таким чином, використання комбінації зеленого і червоного спектральних каналів (ND34) трансформує багатоспектральні супутникові дані у зручний інструмент екологічного управління, дозволяючи автоматизовано ідентифікувати найбільш забруднені зони річкового басейну.

Перехід від традиційного точкового моніторингу до просторового супутникового аналізу дозволяє з високою точністю (до 10 метрів) ідентифікувати локальні зони екологічного ризику – "гарячі точки" в акваторії Південного Бугу [18]. Локалізація таких зон за допомогою дистанційного зондування дає змогу розмежувати вплив точкових та дифузних джерел забруднення. Точкові джерела забруднення формуються переважно за рахунок скидів недостатньо очищених комунально-побутових та промислових стічних вод великих міст, що розташовані на берегах річки [29]. Критичним прикладом такої "гарячої точки" є Сабарівське водосховище в межах водозбору м. Вінниця. Натурні вимірювання зафіксували екстремальну концентрацію азоту амонійного (14,35 мг/дм³) безпосередньо у місці скиду зворотних вод КП «Вінницяоблводоканал», що спровокувало кисневе голодування (гіпоксію) та падіння рівня розчиненого кисню до критичних 1,82–2,92 мгО/дм³ нижче за течією [21]. Супутникові карти індексу хлорофілу (NDCI) дозволяють візуалізувати різкий просторовий градієнт NDCI безпосередньо нижче точок скиду очисних споруд чи промислових об'єктів є беззаперечним дистанційним індикатором точкового забруднення неочищеними стічними водами [22].

Дифузне забруднення пов'язане з поверхневим змивом залишків мінеральних та органічних добрив з інтенсивно оброблюваних агроландшафтів басейну Південного Бугу [29]. На супутникових знімках такі "гарячі точки" проявляються як масштабні зони інтенсивного "цвітіння", які просторово прилягають до великих сільськогосподарських масивів. Це свідчить про високі рівні поверхневого змиву нітратів після опадів [30].

Отримана за допомогою біооптичних індексів (NDCI для фітопланктону та NDAVI, FAI для макрофітів) доказова база є фундаментальною основою для ухвалення ефективних рішень у сфері управління водними ресурсами:

– просторова ідентифікація "гарячих точок" у режимі, наближеному до реального часу, дозволяє екологічним інспекціям і Державному агентству водних ресурсів превентивно виявляти локації дифузних скидів та приховані несанкціоновані стоки стічних вод, оптимізуючи маршрути відбору натурних проб [22].

– супутникові карти (індекси NDAVI та FAI) чітко ідентифікують зони надмірного розростання плаваючих та занурених макрофітів, які виступають потужними накопичувачами азоту. Кероване механічне вилучення цієї рослинності до початку її осіннього відмирання є прямим інженерним способом вилучення накопиченого азоту з екосистеми, що запобігає вторинному забрудненню та покращує трофічний статус річки [29].

– супутникові дані критично необхідні для просторового планування та подальшого моніторингу ефективності штучних водно-болотних угідь. Вони виконують роль природних біофільтрів для перехоплення азотовмісних сполук перед їх потраплянням в основне русло Південного Бугу [22].

В умовах прогресуючого зменшення річкового стоку через кліматичні зміни та ризиків, зумовлених військовими діями, автоматизований супутниковий моніторинг "гарячих точок" стає безальтернативним інструментом антикризового управління для гарантування національної водної безпеки.

Опрацювання багатоспектральних супутникових зображень Sentinel-2 (MSI) за допомогою розробленого автоматизованого алгоритму в GEE дозволило реконструювати просторово-часову динаміку трофічного стану Південного Бугу (рис. 5). Аналіз був зосереджений на літньо-осінньому періоді (червень – вересень) 2019–2025 років, оскільки саме в умовах межені та високих температур вплив азотного навантаження проявляється найгостріше.

Аналіз графіків нормалізованого різницевого індексу хлорофілу (NDCI) виявив значну просторову гетерогенність розподілу біомаси мікроводоростей, що корелює з антропогенними впливами [22]. Найвищі стабільні значення NDCI були зафіксовані на ділянках річки з уповільненим водообміном, зокрема в акваторії Сабарівського водосховища поблизу м. Вінниця. Отримані супутникові дані повністю підтверджуються резуль-

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

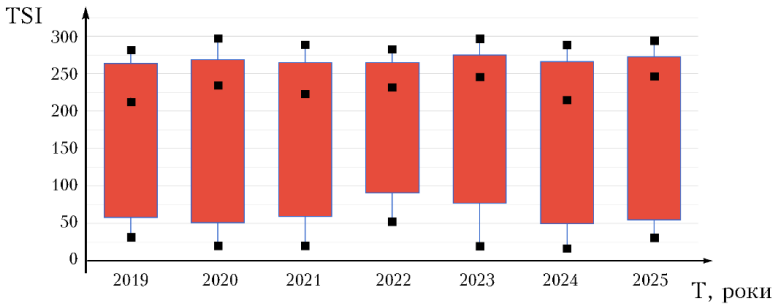


Рис. 4. Діаграма розмаху для трофічного індексу Карлсона у літній період

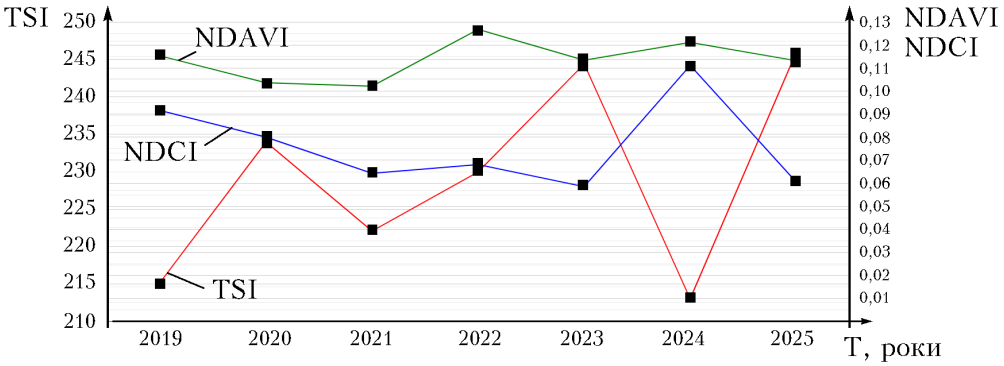


Рис. 5. Порівняння медіанних трендів для трофічного індексу Карлсона (TSI), нормалізованого різницевий індексу хлорофілу (NDCI) та нормалізованого різницевого індексу водної рослинності (NDAVI) у літній період

татами натурного моніторингу. Експоненційне зростання індексу NDCI просторово збігається із зонами екстремального скиду азотовмісних сполук. Так, у травні 2024 року безпосередньо у місці скиду зворотних вод комунальних очисних споруд у Вінниці було зафіксовано концентрацію азоту амонійного – 14,35 мг/дм³, що багатократно перевищує норматив [21]. Біологічна асиміляція такого масиву нутрієнтів фітопланктоном та подальший киснеємний процес бактеріальної нітрифікації призвели до жорсткої гіпоксії: рівень розчиненого кисню нижче за течією впав до критичних 1,82–2,92 мгО/дм³. Таким чином, різкі просторові градієнти NDCI успішно виступили дистанційним маркером точкового азотного забруднення та індикатором зон гострого екологічного ризику (заморних явищ).

Висновки. Впровадження багатоспектральних супутникових даних місії Sentinel-2 (MSI) в архітектуру хмарних обчислень GEE довело свою високу ефективність для великомасштабного екологічного моніторингу зарегульованих річкових систем. На відміну від традиційного точкового відбору проб, просторова роздільна здатність 10–20 метрів дозволяє здійснювати піксельно-точну ідентифікацію зон екологічного ризику на всій протяжності річкового русла. Розрахунок нормалізованого різницевого індексу хлорофілу (NDCI) з використанням спектральних каналів «червоного краю» підтвердив статус мікроводоростей як високочутливого біомаркера гострого забруднення. Просторовий розподіл NDCI дозволив чітко просторово локалізувати "гарячі точки" експоненційного росту біомаси, які безпосередньо корелюють з точковими комунальними скидами та зонами дифузного аграрного стоку. Розроблена дистанційна методологія є фундаментальною основою для ухвалення рішень у сфері управління водними ресурсами. Подальші дослідження мають бути спрямовані на перехід від емпіричних спектральних формул до впровадження алгоритмів машинного навчання та мультисенсорного злиття даних, що дозволить прогнозувати трофічні кризи та гарантувати національну водну безпеку в умовах техногенного та військового навантаження.

Перспективи використання результатів дослідження. Розроблена методологія слугує фундаментальною базою для ухвалення ефективних управлінських рішень у сфері водного менеджменту, оскільки дозволяє об'єктивно

локалізувати первинні джерела та шляхи міграції азотного навантаження. Крім того, просторова ідентифікація надмірного розростання рослинності необхідна для раціонального планування керованого механічного вилучення макрофітів, а також для проєктування та моніторингу штучних водно-болотних угідь як природних біофільтрів.

Література

1. Salls W., Schaeffer B., Pahlevan N., Coffer M., Seegers B., Werdell P., Ferriby H., Stumpf R., Binding C., Keith D. Expanding the Application of Sentinel-2 Chlorophyll Monitoring across United States Lakes. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16, № 11. P. 1977. DOI: 10.3390/rs16111977.
2. Shakhman I., Bystriantseva A. Water Quality Assessment of the Surface Water of the Southern Bug River Basin by Complex Indices. *Journal of Ecological Engineering*. 2021. Vol. 22, № 1. P. 195–205. DOI: 10.12911/22998993/128858.
3. Belous Ye. P., Barinova S. S., Klochenko P. D. Phytoplankton of the upper Section of the South Bug River as Indicator of its Ecological Status. *Hydrobiological Journal*. 2013. Vol. 49, № 1. P. 39–50. DOI: 10.1615/HydrobJ.v49.i1.50.
4. Ansper-Toomsalu A., Uusõue M., Kangro K., Hieronymi M., Alikas K. Suitability of different in-water algorithms for eutrophic and absorbing waters applied to Sentinel-2 MSI and Sentinel-3 OLCI data. *Frontiers in Remote Sensing*. 2024. Vol. 5. P. 1423332. DOI: 10.3389/frsen.2024.1423332.
5. Lopez Barreto B. N., Hestir E. L., Lee C. M., Beutel M. W. Satellite Remote Sensing: A Tool to Support Harmful Algal Bloom Monitoring and Recreational Health Advisories in a California Reservoir. *GeoHealth*. 2024. Vol. 8, № 2. P. e2023GH000941. DOI: 10.1029/2023GH000941.
6. He H., Chen K., Du Y., Li K., Liu Z., Jeppesen E., Søndergaard M. Increased Nitrogen Loading Boosts Summer Phytoplankton Growth by Alterations in Resource and Zooplankton Control: A Mesocosm Study. *Frontiers in Environmental Science*. 2021. Vol. 9. P. 772314. DOI: 10.3389/fenvs.2021.772314.
7. Ogashawara I., Kiel C., Jechow A., Kohnert K., Ruhtz T., Grossart H.-P., Hölker F., Nejstgaard J. C., Berger S. A., Wollrab S. The Use of Sentinel-2 for Chlorophyll-a Spatial Dynamics Assessment: A Comparative Study on Different Lakes in Northern Germany. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, № 8. P. 1542. DOI: 10.3390/rs13081542.
8. Rakasachat C., Chaichana R., Phonmat P., Klongvessa P., Moukomla S., Chanthorn W. Integrating Satellite Remote Sensing and Field Measurements for Assessing Nitrogen and Phosphorus Dynamics in Tropical Freshwater Ecosystems of Thailand. *Environments*. 2026. Vol. 13, № 1. P. 57. DOI: 10.3390/environments13010057.
9. Aranha T. R. B. T., Martinez J.-M., Souza E. P., Barros M. U. G., Martins E. S. P. R. Remote Analysis of the Chlorophyll-a Concentration Using Sentinel-2 MSI Images in a Semiarid Environment in Northeastern Brazil. *Water*. 2022. Vol. 14, № 3. P. 451. DOI: 10.3390/w14030451.
10. Bytyçi P., Shala-Abazi A., Zhushi-Etemi F., Bonifazi G., Hyseni-Spahiu M., Fetoshi O., Çadraku H., Feka F., Millaku F. The Macrophyte Indices for Rivers to Assess the Ecological Conditions in the Klina River in the Republic of Kosovo. *Plants*. 2022. Vol. 11, № 11. P. 1469. DOI: 10.3390/plants11111469.
11. Soriano-González J., Urrego E. P., Sòria-Perpinyà X., Angelats E., Alcaraz C., Delegido J., Ruíz-Verdú A., Tenjo C., Vicente E., Moreno J. Towards the Combination of C2RCC Processors for Improving Water Quality Retrieval in Inland and Coastal Areas. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, № 5. P. 1124. DOI: 10.3390/rs14051124.
12. Xin Y., Luo J., Zhai J., Wang K., Xu Y., Qin H., Chen C., You B., Cao Q. An Automatic Algorithm for Mapping Algal Blooms and Aquatic Vegetation Using Sentinel-1 SAR and Sentinel-2 MSI Data. *Land*. 2025. Vol. 14, № 3. P. 592. DOI: 10.3390/land14030592.
13. Hu C. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans. *Remote Sensing of Environment*. 2009. Vol. 113, № 10. P. 2118–2129. DOI: 10.1016/j.rse.2009.05.012.
14. Thamaga K. H., Dube T. Remote sensing of invasive water hyacinth (Eichhornia crassipes): A review on applications and challenges. *Remote Sensing Applications: Society and Environment.* 2018. Vol. 10. P. 36–46. DOI: 10.1016/j.rsase.2018.02.005.
15. Wang L., Xu M., Liu Y., Liu H., Beck R., Reif M., Emery E., Young J., Wu Q. Mapping Freshwater Chlorophyll-a Concentrations at a Regional Scale Integrating Multi-Sensor Satellite Observations with Google Earth Engine. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, № 20. P. 3278. DOI: 10.3390/rs12203278.
16. Wolters T., Detenbeck N. E., Rego S., Freeman M. Evaluation of Atmospheric Preprocessing Methods and Chlorophyll Algorithms for Sentinel-2 Imagery in Coastal Waters. *Remote Sensing*. 2025. Vol. 17, № 20. P. 3503. DOI: 10.3390/rs17203503.
17. Akbarnejad Nesheli S., Quackenbush L. J., McCaffrey L. Estimating Chlorophyll-a and Phycocyanin Concentrations in Inland Temperate Lakes across New York State Using Sentinel-2 Images: Application of Google Earth Engine for Efficient Satellite Image Processing. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16, № 18. P. 3504. DOI: 10.3390/rs16183504.
18. Kwong I. H. Y., Wong F. K. K., Fung T. Automatic Mapping and Monitoring of Marine Water Quality Parameters in Hong Kong Using Sentinel-2 Image Time-Series and Google Earth Engine Cloud Computing. *Frontiers in Marine Science*. 2022. Vol. 9. P. 871470. DOI: 10.3389/fmars.2022.871470.
19. Karakus P. Detection of Water Surface Using Canny and Otsu Threshold Methods with Machine Learning Algorithms on Google Earth Engine: A Case Study of Lake Van. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, № 6. P. 2903. DOI: 10.3390/app15062903.
20. He H., Zhang L., Ning X., Mao Z., Jeppesen E. Nitrogen loading increases both algal and non-algal turbidity in subtropical shallow mesocosms: Implication for nutrient management. *Knowledge & Management of Aquatic Ecosystems*. 2023. № 424. P. 23. DOI: 10.1051/kmae/2023019.
21. Результати чергового спостереження якості поверхневої води річки Південний Буг. Державна екологічна інспекція у Вінницькій області. Офіційний веб-портал. URL: https://www.vin.gov.ua/images/doc/vin/ODA/ogoloshenia/Zvit_SEO.pdf (дата звернення: 05.01.2026).

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

22. Kvaterniuk S., Mandebura S., Latusha D., Maksymenko M., Mykhalchuk O. Prevention of contamination of the Southern Bug River with nitrogen compounds using constructed wetlands. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*. 2025. Vol. 16. № 1. P. 89-97. DOI: 10.63341/esbur/1.2025.89.
23. Khanna S., Hestir E. L., Bellvert J., Boyer J. D., Shapiro K. D., Ustin S. L. A new index for detection of submerged aquatic plants under variable quality water: an extension of the soil-line concept. *GIScience & Remote Sensing*. 2024. Vol. 61, № 1. P. 2399386. DOI: 10.1080/15481603.2024.2399386.
24. Ade C., Khanna S., Lay M., Ustin S. L., Hestir E. L. Genus-Level Mapping of Invasive Floating Aquatic Vegetation Using Sentinel-2 Satellite Remote Sensing. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, № 13. P. 3013. DOI: 10.3390/rs14133013.
25. Rodríguez-Garlito E. C., Paz-Gallardo A., Plaza A. Mapping Invasive Aquatic Plants in Sentinel-2 Images Using Convolutional Neural Networks Trained With Spectral Indices. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2023. Vol. 16. P. 2889–2899. DOI: 10.1109/JSTARS.2023.3257142.
26. SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index). Sentinelhub. URL: https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/savi/ (дата звернення: 05.01.2026).
27. Huete A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*. 1988. Vol. 25, № 3. P. 295–309. DOI: 10.1016/0034-4257(88)90106-X.
28. Sherjah P. Y., Sajikumar N., Nowshaja P. T. Quality monitoring of inland water bodies using Google Earth Engine. *Journal of Hydroinformatics*. 2023. Vol. 25, № 2. P. 432–450. DOI: 10.2166/hydro.2023.137.
29. Kvaterniuk S.M., Petruk V.G., Frolov V.F., Onyschuk V.E.,Wojcik W., Pawlowski L., Smailova S., Kalizhanova A. Restoration Of The Southern Bug River Ecosystem By Removing The Biomass Of Higher Water Plants. *International Journal of Conservation Science*. 2021. Vol. 12. Special Issue 1. P. 755-764.
30. Asres B. W., Kebedew M. G., Nerae M. D., Tsegaye S., Zimale F. A. Remote sensing-based estimation of Chlorophyll-a concentrations in a water hyacinth-infested tropical headwaters lake: a study of Lake Tana, Ethiopia. *Frontiers in Water*. 2025. Vol. 7. P. 1600222. DOI: 10.3389/frwa.2025.1600222.

Дата першого надходження статті до видання: 07.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 628.161:556.3
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.6

ПОКРАЩЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ФІЗІОЛОГІЧНОЇ ПОВНОЦІННОСТІ АРТЕЗІАНСЬКИХ ВОД ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ПРИРОДНИХ МІНЕРАЛІВ

Мацюк С.А.[1], **Яковлєв В.В.**[2], **Дмитренко Т.В.**[2]
[1]ТОВ «Лабораторія якості води «ПЛАЯ»
вул. Георгіївська, 10, 61010, м. Харків
[2]Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
вул. Чорноглазівська, 17, 61002, м. Харків
svetmat@ukr.net, yakovlev030157@gmail.com, tetyana.dmytrenko@kname.edu.ua

Стаття присвячена вирішенню актуальної проблеми підвищення фізіологічної повноцінності та покращення органолептичних властивостей м'яких артезіанських вод, що використовуються для питного водопостачання. Об'єкт дослідження – артезіанська вода верхньоюрського водоносного комплексу, яка за основними показниками відповідає нормативним вимогам, проте має критично низьку загальну жорсткість (0,15–1,1 ммоль/дм³), що не відповідає критерію фізіологічної повноцінності й створює певні ризики для здоров'я споживачів.

У роботі проведено порівняльний аналіз ефективності кондиціювання води природними мінералами – доломітом, шунгітом та цеолітом – в статичних і динамічних умовах. Встановлено неефективність статичного контакту та негативний вплив шунгіту на якість води (поява запаху сірководню). Найефективнішим виявився динамічний режим фільтрації крізь напівобпалене доломітове завантаження.

Експериментально підтверджено можливість інтенсифікації збагачення води кальцієм і магнієм при розчиненні напівобпаленого доломіту у підкисленій воді. Підкислення до pH 5,7 дозволило збільшити загальну жорсткість води у 12 разів (з 0,3 до 3,6 ммоль/дм³), що відповідає критеріям фізіологічної повноцінності; при цьому вміст кальцію зріс у 15 разів, а магнію – у 6 разів. Визначено оптимальні параметри процесу: швидкість фільтрування – 5 м/год, тривалість контакту вихідної води із завантаженням доломіту фракції 10–30 мм – 10 хв.

Результати органолептичної оцінки підтвердили суттєве покращення смакових якостей кондиційованої води. Практична значущість результатів полягає у створенні наукового підґрунтя для розробки мобільних модульних установок децентралізованого водопостачання. Це є стратегічно важливим для територіальних громад та промислових підприємств в умовах кризового стану з якістю водопровідної води й енергетичних викликів, оскільки дозволяє на базі надійно захищених водоносних горизонтів забезпечити населення якісною водою за допомогою компактних та економічно доступних систем. *Ключові слова:* артезіанська вода, природні мінерали, загальна жорсткість, смакові якості води, кондиціювання води, фізіологічна повноцінність, доломіт, цеоліт, шунгіт, децентралізоване водопостачання.

Improvement of artesian waters physiological adequacy indices using natural minerals. Matsiuk S., Yakovlev V., Dmytrenko T.
The article is devoted to solving the urgent problem of increasing the physiological adequacy and improving the organoleptic properties of soft artesian waters used for drinking water supply. The object of study is artesian water from the Upper Jurassic aquifer. While its primary indicators meet regulatory requirements, the water exhibits critically low total hardness (0,15–1,1 mmol/dm³). This fails to meet the criteria for physiological adequacy and poses certain health risks to consumers.

The paper provides a comparative analysis of the efficiency of water conditioning with natural minerals – dolomite, shungite, and zeolite – under static and dynamic conditions. The inefficiency of static contact and the negative impact of shungite on water quality (the appearance of a hydrogen sulfide odour) have been established. The highest efficiency was achieved by the dynamic filtration mode using a semi-calcined dolomite load.

The possibility of intensifying the enrichment of water with calcium and magnesium by dissolving semi-calcined dolomite in acidified water has been experimentally confirmed. Acidifying the water to pH 5.7 increased the overall water hardness by a factor of 12. (from 0,3 to 3,6 mmol/dm³), meeting the criteria for physiological adequacy. Specifically, the calcium content increased 15-fold, and the magnesium content increased 6-fold. The optimal process parameters were determined to be a filtration rate of 5 m/h and a 10-minute contact time between the source water and the dolomite media (fraction size 10–30 mm).

The results of the organoleptic evaluation confirmed a significant improvement in the taste of conditioned water. The practical significance of the obtained results lies in creating a scientific basis for the development of mobile modular units for decentralised water supply. This is strategically important for local communities and industrial enterprises amid the crisis in tap water quality and ongoing energy challenges. Using securely protected aquifers allows us to provide high-quality water to the population through compact and cost-effective systems. *Key words:* artesian water, natural minerals, total hardness, water taste, water conditioning, physiological adequacy, dolomite, zeolite, shungite, decentralised water supply.

© Мацюк С.А., Яковлєв В.В., Дмитренко Т.В., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. Протягом останніх років актуальність забезпечення населення фізіологічно повноцінною питною водою суттєво зросла. Проте часто навіть артезіанська вода, попри її відповідність чинним санітарно-гігієнічним нормативам, за низкою показників (зокрема за рівнем загальної жорсткості) не відповідає критеріям фізіологічної повноцінності.

У випадках, коли невідповідність води нормативним вимогам зумовлена природними чинниками й залишається стабільною протягом тривалої експлуатації свердловин, особливого значення набуває пошук ефективних та економічно доступних методів кондиціювання для корекції складу води, що використовується для питних цілей. Оскільки підземні води, особливо артезіанські, відрізняються стабільністю якісних характеристик, такі методи кондиціювання дозволяють забезпечити доведення їхніх параметрів до необхідного рівня фізіологічної повноцінності.

Актуальність дослідження. Характерним прикладом природних вод із порушеним мінеральним балансом є артезіанські води верхньоюрського й альб-сеноманського водоносних комплексів Дніпровсько-Донецького артезіанського басейну. Завдяки високому ступеню природної захищеності ці води можуть бути надійним джерелом питного водопостачання північно-східного регіону України, особливо в умовах антропогенного навантаження на поверхневі джерела. Однак природною специфікою вказаних горизонтів у деяких районах є критично низька загальна жорсткість – 0,15–1,1 ммоль/дм^3, що визначає їхню фізіологічну неповноцінність. Згідно з нормативними вимогами [1] показник загальної жорсткості повноцінної питної води має знаходитися в межах 1,5–7,0 ммоль/дм^3.

Медичні дослідження підтверджують, що тривале споживання м'якої води зумовлює розвиток рахіту, розладів ферментативної та шлункової секреції, порушень у роботі центральної нервової системи, зниження еластичності судин та вимивання кальцію з кісток [2–6]. Зазначене обґрунтовує доцільність корекції показника жорсткості артезіанських вод до фізіологічно оптимальних значень.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Тематика дослідження відповідає державній політиці у сфері гарантування безпечних умов життєдіяльності населення та охорони водних ресурсів. Робота базується на положеннях Водного кодексу України [7] та Закону України «Про національну безпеку України» [8]. Дослідження безпосередньо спрямоване на реалізацію стратегічних цілей, визначених у Водній стратегії України на період до 2050 року [9] та Законі України «Про питну воду та питне водопостачання» [10]. Практична значущість результатів узгоджується з пріоритетами профільних державних програм, зокрема Загальнодержавної цільової соціальної програми «Питна вода України» на 2022–2026 роки [11], Державної цільової соціальної програми покращення питного водопостачання України на період до 2035 року [12] та інших нормативно-правових актів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасній науковій літературі питання підвищення жорсткості питної води висвітлено значно менше порівняно з технологіями її пом'якшення. Стереотип про безумовні переваги м'якої води сформувався переважно в країнах, де централізоване водопостачання традиційно базується на джерелах з надлишковим вмістом солей жорсткості. Зазвичай корекція мінерального складу асоціюється з використанням хімічних реагентів, що ускладнює та здорожує процес водопідготовки. Проте наявність сполук кальцію та магнію у складі поширених природних мінералів (вапняку, доломіту, мергелю тощо) відкриває перспективу їх використання як екологічно безпечної та економічно ефективної альтернативи хімічним методам.

Оскільки співвідношення іонів кальцію та магнію в питній воді має бути чітко збалансованим, основну увагу авторів зосереджено на дослідженні доломіту – природного карбонату кальцію і магнію $CaMg(CO_3)_2$. Для порівняльної оцінки ефекту кондиціювання також було випробувано інші природні мінерали – шунгіт та цеоліт.

Метою роботи є дослідження ефективності використання природних мінералів для підвищення фізіологічної повноцінності та поліпшення органолептичних властивостей артезіанських вод.

Матеріали та методика дослідження. Об'єктом дослідження обрано підземну воду зі свердловини № 5768, що забезпечує водопостачання АТ «Ефект» у м. Харкові. Свердловиною глибиною 812 м, що розташована на території підприємства, експлуатується верхньоюрський водоносний комплекс. За результатами фізико-хімічного аналізу встановлено, що вода є прісною з мінералізацією 0,6 г/дм^3 і належить до хлоридно-гідрокарбонатного натрієвого типу. Багаторічний моніторинг підтверджує стабільність хімічного складу досліджуваної води. Вона відповідає вимогам ДСанПіН 2.2.4-171-10 «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» за всіма показниками, проте не відповідає критерію фізіологічної повноцінності за рівнем загальної жорсткості: фактичне значення становить 0,3–0,6 ммоль/дм^3 при рекомендованому діапазоні – 1,5–7,0 ммоль/дм^3. Дефіцит солей жорсткості у поєднанні з підвищеним вмістом іонів натрію та хлоридів зумовлює специфічні органолептичні властивості води, зокрема характерний гіркувато-солонуватий присмак.

Експериментальне вивчення впливу природних мінералів на хімічний склад та органолептичні властивості води здійснювали на базі науково-дослідної лабораторії ТОВ «Лабораторія якості води «ПЛАЯ».

Для забезпечення об'єктивності результатів та підтвердження стабільності фізико-хімічних показників підземної води протягом періоду досліджень у роботі також використано дані моніторингу хіміко-бактеріологічної лабораторії АТ «Ефект».

Викладення основного матеріалу. Методика експериментальних досліджень передбачала порівняльний аналіз впливу природних мінералів – цеоліту, шунгіту та доломіту – на органолептичні та гідрохімічні показники якості води. Для визначення ефективності експерименту досліди проводили на двох типах розчинів: вихідній воді зі свердловини та попередньо демінералізованій (знесоленій) воді.

Експеримент реалізовували у два етапи: у статичних та динамічних умовах.

На першому етапі вивчали вплив мінералів на склад води у статичному режимі. У скляні ємності об'ємом 3 л вносили навіски подрібнених природних мінералів (фракція 10–30 мм) масою 500 г, після чого заповнювали їх водою. Для інтенсифікації процесів масообміну здійснювали періодичне перемішування. Лабораторний контроль показників та органолептичну оцінку проводили через 24 години. Встановлено, що контакт води із шунгітом спричиняє появу різкого запаху та присмаку сірководню, що зумовило виключення цього мінералу з подальших етапів дослідження. Результати хімічного аналізу води після контакту з цеолітом та доломітом наведено в табл. 1 та 2.

Згідно з даними табл. 1, взаємодія води з мінералами призвела до збільшення водневого показника до значень 8,23–8,48. Найбільш виражена динаміка зафіксована при контакті з доломітом: показник загальної жорсткості зріс із 0,05 ммоль/дм³ у вихідній воді до 1,70 ммоль/дм³. Таким чином, жорсткість збільшилася у 34 рази, що дозволило досягти нормативного діапазону фізіологічної повноцінності питної води.

Аналогічно до результатів зі знесоленою водою, контакт артезіанської води з шунгітом супроводжувався появою інтенсивного сірководневого запаху та специфічного присмаку, що унеможливило подальше використання отриманих зразків.

Аналіз даних табл. 2 свідчить, що гідрохімічні показники артезіанської води зі свердловини після

Таблиця 1

Результати кондиціювання знесоленої води в статичних умовах

Показник	Одиниця виміру	Вихідна вода	Після контакту з цеолітом	Після контакту з доломітом
pH	од. pH	5,5	8,48	8,23
Окиснюваність	мгO_2/дм³	менше ніж 1,0	менше ніж 1,0	менше ніж 1,0
Запах при 20⁰	бал	0	0	0
Смак	бал	1	0	0
Гідрокарбонати	мг/дм³	15,2	91,5	153,0
	ммоль/дм³	0,24	1,50	2,50
Сульфати	мг/дм³	19,2	19,2	28,8
Хлориди	мг/дм³	101	105	125
Кальцій	мг/дм³	–	–	28,0
Магній	мг/дм³	–	–	3,60
Жорсткість загальна	ммоль/дм³	0,05	0,05	1,70

Таблиця 2

Результати кондиціювання артезіанської води в статичних умовах

Показник	Одиниця виміру	Вихідна вода	Після контакту з цеолітом	Після контакту з доломітом
pH	од. pH	8,67	8,63	8,62
Окиснюваність	мгO_2/дм³	менше ніж 1,0	менше ніж 1,0	менше ніж 1,0
Запах при 20⁰	бал	0	0	0
Смак	бал	1	0	0
Гідрокарбонати	мг/дм³	360	355	360
	ммоль/дм³	5,89	5,83	5,82
Сульфати	мг/дм³	19,2	19,2	19,2
Хлориди	мг/дм³	85,0	85,0	88,6
Кальцій	мг/дм³	4,01	4,01	5,01
Магній	мг/дм³	1,80	1,80	1,82
Жорсткість загальна	ммоль/дм³	0,35	0,35	0,40

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

статичного контакту з доломітом і цеолітом залишаються практично незмінними. Відсутність значущої динаміки складу та незадовільні результати дегустації підтвердили неефективність статичного режиму кондиціювання.

Наступний етап експерименту реалізовувався у динамічних умовах. Для моделювання процесу було використано насипний фільтр, що являє собою вертикальну скляну колону з верхньою подачею води. Колону заповнювали природним мінеральним завантаженням масою 800 г. Процес фільтрації здійснювався зі швидкістю 0,2 м/год. Як і в попередніх випробуваннях, органолептична оцінка підтвердила непридатність води після контакту з шунгітом через інтенсивний сторонній запах та присмак. Результати хіміко-аналітичного контролю води після фільтрації крізь інші мінеральні завантаження систематизовано в табл. 3 та 4.

Аналіз даних табл. 3 свідчить, що найвищу ефективність кондиціювання забезпечує контакт із доломітовим завантаженням. Зокрема, зафіксовано зростання водневого показника pH до 8,14. При цьому значення лужності та загальної жорсткості досягли рівнів, що відповідають критеріям фізіологічної повноцінності – 1,40 та 1,80 ммоль/дм^3 відповідно (при нормативних межах 0,5–6,0 та 1,5–7,0 ммоль/дм^3). Спостережуване збільшення вмісту сульфатів, імовірно, зумовлене наявністю в структурі доломіту домішок мінералу природного походження – піриту.

У табл. 4 представлено результати порівняльного аналізу гідрохімічних показників якості артезіанської води до та після фільтрації в ідентичних умовах.

Результати попередніх етапів засвідчили, що для підвищення концентрацій іонів кальцію та магнію доцільно використовувати матеріал, збагачений кальцієм і магнієм – напівобпалений доломіт. Його перевага полягає у високій реакційній здатності, що є наслідком декарбонізації магнієвої складової мінералу. Встановлено, що попереднє підкислення вихідної води перед її подачею на фільтр суттєво підвищує швидкість реакції. Для регулювання pH середовища в межах експерименту використано лимонну кислоту. Швидкість фільтрації було збільшено

Таблиця 3

Результати кондиціювання знесоленої води в динамічних умовах

Показник	Одиниця виміру	Вихідна вода	Після контакту з цеолітом	Після контакту з доломітом
pH	од. pH	5,5	7,35	8,14
Окиснюваність	мгO_2/дм^3	менше ніж 1,0	менше ніж 1,0	менше ніж 1,0
Запах при 20^0	бал	0	0	0
Смак	бал	1	0	0
Гідрокарбонати	мг/дм^3	15,2	30,5	85,4
	ммоль/дм^3	0,24	0,50	1,40
Сульфати	мг/дм^3	19,2	19,6	57,6
Хлориди	мг/дм^3	101	101	103
Кальцій	мг/дм^3	–	2,00	26,1
Магній	мг/дм^3	–	0,61	6,10
Жорсткість загальна	ммоль/дм^3	0,05	0,15	1,80

Таблиця 4

Результати кондиціювання артезіанської води в динамічних умовах

Показник	Одиниця виміру	Вихідна вода	Після контакту з цеолітом	Після контакту з доломітом
pH	од. pH	8,67	8,70	8,69
Окиснюваність	мгO_2/дм^3	менше ніж 1,0	менше ніж 1,0	менше ніж 1,0
Запах при 20^0	бал	0	0	0
Смак	бал	1	0	0
Гідрокарбонати	мг/дм^3	360,0	338,2	338,2
	ммоль/дм^3	5,89	5,54	5,54
Сульфати	мг/дм^3	19,2	19,2	28,8
Хлориди	мг/дм^3	85,0	71,8	88,6
Кальцій	мг/дм^3	4,01	4,01	5,01
Магній	мг/дм^3	1,80	1,80	1,82
Жорсткість загальна	ммоль/дм^3	0,35	0,35	0,40

до 5 м/год, а тривалість контакту води з мінералом становила 10 хв. Результати цього етапу досліджень систематизовано в табл. 5.

Згідно з даними табл. 5, застосування запропонованої методики дозволило досягти оптимальних параметрів кондиціювання: рівень pH збільшився

Таблиця 5

Результати кондиціювання підкисленої артезіанської води (до pH 5,7) з використанням фільтра з напівобпаленим доломітом

Показник	Одиниця виміру	Вихідна вода	Після 10 хв контакту з доломітом
pH	од. pH	5,7	7,15
Окиснюваність	мгO_2/дм^3	менше ніж 1,0	менше ніж 1,0
Запах при 20^0	бал	0	0
Смак	бал	1	0
Гідрокарбонати	мг/дм^3	355,6	311,2
	ммоль/дм^3	5,50	5,10
Сульфати	мг/дм^3	24,0	62,0
Хлориди	мг/дм^3	80,8	82,6
Кальцій	мг/дм^3	4,01	60,1
Магній	мг/дм^3	1,22	7,30
Жорсткість загальна	ммоль/дм^3	0,30	3,60
Натрій+калій	мг/дм^3	183,3	117,9
Залізо загальне	мг/дм^3	менше ніж 0,05	менше ніж 0,05

до 7,15, а загальна жорсткість зросла до 3,6 ммоль/дм³. Важливо зазначити, що концентрації сульфатів і хлоридів при цьому збільшилися незначно. Порівняно з вихідною артезіанською водою, вміст іонів кальцію зріс у 15 разів, а магнію – у 6 разів. Таке 12-кратне підвищення загальної жорсткості до фізіологічно оптимальних величин і забезпечило суттєве покращення органолептичних властивостей. Це було підтверджено результатами «сліпої» дегустаційної оцінки. Зразки води, що пройшли обробку на фільтрі з напівобпаленим доломітом, отримали найвищу експертну оцінку за своїми смаковими якостями.

Головні висновки. Встановлено, що найбільш ефективним методом кондиціювання м'якої артезіанської води верхньоюрського водоносного комплексу, який забезпечує поліпшення її органолептичних властивостей, є фільтрація в динамічному режимі крізь завантаження з напівобпаленого доломіту. Експериментально доведено, що попереднє підкислення вихідної води лимонною кислотою до рівня pH 5,7 суттєво інтенсифікує процес насичення води іонами кальцію і магнію. Це забезпечує зростання загальної жорсткості з 0,3 ммоль/дм³ до фізіологічно повноцінного значення для питної води – 3,6 ммоль/дм³.

Встановлено оптимальні параметри процесу: фракція завантаження – 10–30 мм, швидкість фільтрування – 5 м/год, тривалість контакту фаз – 10 хв. Такі параметри гарантують високі смакові якості та стабільний сольовий склад кондиційованої води.

Перспективи використання результатів досліджень. Отримані результати створюють науково-технічне підґрунтя для розробки мобільних модульних установок кондиціювання м'яких артезіанських вод. Впровадження таких рішень є пріоритетним не лише для промислових підприємств, зокрема АТ «Ефект», а й для територіальних громад з метою забезпечення населення якісною питною водою в умовах дефіциту водних ресурсів.

Література

1. ДСанПіН 2.2.4-171-10. Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною. *Офіційний вісник України.* 2010. № 51. Ст. 1717. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text (дата звернення: 15.04.2026).
2. Nutrients in Drinking-water. World Health Organization (WHO), Geneva, 2005. 196 p. URL: https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/ee809f3c-d909-4138-9242-002bce630853/content (дата звернення: 15.04.2026).
3. He Q., Sun M., Huang J. et al. Water hardness and digestive diseases: a large-scale population-based prospective cohort study. *International Journal of Surgery*. 2026. Vol. 112, Is. 1. P. 922–934. DOI: 10.1097/JS9.0000000000003506
4. Li S., Zhou H., Chen J. et al. Associations between domestic water hardness and risk of experiencing 15 different cardiovascular events: a prospective cohort study of 324,136 United Kingdom Biobank participants. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 2025. Vol. 122, Is. 6. P. 1613–1624. DOI: 10.1016/j.ajcnut.2025.10.004
5. Helte E., Save-Soderbergh M., Larsson SC., Akesson A. Calcium and magnesium in drinking water and risk of myocardial infarction and stroke-a population-based cohort study. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 2022. Vol. 116, Is. 4. P. 1091–1100. DOI: 10.1093/ajcn/nqac186

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

6. Nardi G., Donato F., Monarca S., Gelatti U. [Drinking water hardness and chronic degenerative diseases. I. Analysis of epidemiological research]. *Annali di Igiene: Medicina Preventiva e di Comunità.* 2003. Vol. 15, Is. 1. P. 35–40. PMID: 12666323.
7. Водний кодекс України : Закон України від 06.06.1995 № 213/95-ВР. *Відомості Верховної Ради України*. 1995. № 24. Ст. 189. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-вр (дата звернення: 20.04.2026).
8. Про національну безпеку України : Закон України від 21.06.2018 № 2469-VIII. *Відомості Верховної Ради України*. 2018. № 31. Ст. 241. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2469-19 (дата звернення: 20.04.2026).
9. Водна стратегія України на період до 2050 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 09.12.2022 р. № 1134-р. *Урядовий кур'єр*. 2022. № 267. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1134-2022-р (дата звернення: 20.04.2026).
10. Про питну воду та питне водопостачання : Закон України від 10.01.2002 № 2918-III. *Відомості Верховної Ради України*. 2002. № 16. Ст. 112. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2918-14 (дата звернення: 20.04.2026)
11. Про схвалення Концепції Загальнодержавної цільової програми «Питна вода України» на 2022–2026 роки: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 28.04.2021 р. № 388-р. *Офіційний вісник України*. 2021. № 37. Ст. 2250. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/388-2021-р (дата звернення: 20.04.2026).
12. Про схвалення Концепції Державної цільової соціальної програми покращення питного водопостачання України на період до 2035 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 19.11.2025 р. № 1271-р. URL: https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-s-pytnoho-vodopostachannia-ukrainy-na-period-do-2035-roku-i-1271 (дата звернення: 20.04.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 30.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 338.512:797:332.14
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.7

НАУКОВО-ПРАКТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЦІНОУТВОРЕННЯ РЕКРЕАЦІЙНОЇ ОДИНИЦІ ПОСЛУГ НА ВОДНИХ ОБ'ЄКТАХ МІСТА

Шевченко Р.Ю.
Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ
azimut90@ukr.net

Науково обґрунтовано процедури монетизації екосистемних послуг під час реалізації рекреаційної діяльності на водних об'єктах міста. Науково-практичною проблемою постає відсутність наукового базису методики розрахунку вартісної оцінки рекреаційних послуг на екологічних засадах, що унеможливлює впровадження ринку екосистемних послуг та механізмів платежів за них. Сучасні процеси формування та реалізації ціноутворення рекреаційних одиниць послуг, що функціонують на базі водних об'єктів у межах урбанізованих територій, спонукають до здійснення окремого дослідження. Мета – розроблення та наукове обґрунтування комплексної методики формування цінової політики рекреаційної діяльності на водних об'єктах міста, що гармонізувала б інтереси зацікавлених сторін, зокрема, бізнесу у забезпеченні прибутковості та міської громади у гарантіях доступності із раціональною системою природокористування, екологічним станом відтворення відновлювальних ресурсів. Предметом дослідження постає сукупність теоретико-методичних засад та підходів, математичного інструментарію для наукового обґрунтування ціноутворення рекреаційної одиниці послуг, що надаються на водних об'єктах, з урахуванням їхньої екологічної цінності, а таклж соціально-економічного статусу території. Методами дослідження та апробації результатів стали фундаментальні положення сучасної економічної географії, геоекології та статистики. У науковій праці використані різні прийоми досліджень: системний підхід знайшов застосування під час формулювання термінологічного обґрунтування акваторіально-територіального рекреаційного комплексу, а методи статистики-при аналізі монетизації договірної бази фіксації рекреаційних послуг; алгоритми економіко-математичне моделювання стали пріоритетними в обґрунтуванні формули ціноутворення. Як наслідок, розроблена формула монетизації екосистемних послуг у сфері рекреаційної діяльності на водних об'єктах міста. Сформульовані рекомендації щодо вдосконалення фіксації відповідної сфери господарювання із використанням фотографічних, картографічних та геоінформаційних прийомів. *Ключові слова:* акваторіально-територіальний рекреаційний комплекс, рекреаційні екосистемні послуги, економічна оцінка, ціноутворення, монетизація.

Scientific and practical substantiation of pricing for recreational service units at water bodies in urban areas. Shevchenko R.
The study is devoted to the scientific substantiation of the monetization procedure for ecosystem services within recreational activities at water bodies in urban areas. A significant scientific and practical problem lies in the absence of a theoretical basis for calculating the valuation of recreational services on an ecological footing, which hinders the implementation of ecosystem service markets and payment mechanisms. The object of the study is the processes of forming and implementing pricing for recreational service units operating at water bodies within urban areas. The purpose of the research is to develop and scientifically substantiate a comprehensive methodology for establishing a pricing policy for recreational activities at water bodies in urban areas, aimed at harmonizing the interests of businesses in ensuring profitability, the municipal community in guaranteeing accessibility, and a rational environmental management system focused on the ecological restoration of renewable resources. The subject of the research encompasses the set of theoretical and methodological foundations, approaches, and mathematical tools for the scientific substantiation of pricing for recreational service units provided at water bodies, accounting for their ecological value and the socio-economic status of the territory. The research methods and validation of results are based on the fundamental principles of modern economic geography, geoecology, and statistics. To achieve the stated goal, the following research techniques were employed: a systems approach was applied to formulate the terminological substantiation of the "Aquatic-territorial recreational complex"; statistical methods were used to analyze the monetization of the contractual framework for recreational services; and economic-mathematical modeling algorithms were prioritized in substantiating the pricing formula.
The scientific result of the study is a developed formula for the monetization of ecosystem services in the field of recreational activities at urban water bodies. Recommendations have been formulated to improve the recording of the respective economic sector using photographic, cartographic, and geoinformation techniques. *Key words:* aquatic-territorial recreational complex, recreational ecosystem services, economic valuation, pricing, monetization.

Постановка проблеми. Актуальність дослідження. Сучасний розвиток мегаполісів вимагає наукового обґрунтування та концептуалізації монетизації рекреаційного природокористування. Незважаючи на вимоги Водного кодексу України [2] та Закону України «Про благоустрій населених пунктів» [7], у сфері надання рекреаційних послуг на водних об'єктах відсутнє термінологічне забезпечення відповідної сфери економічної діяльності. Відсутність уніфікованого глосарія призводить до подвійного трактування прав та обов'язків суб'єктів господарювання, що ускладнює процес реалі-

© Шевченко Р.Ю., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

зації цінової політики у сфері рекреаційних послуг та знижує ефективність менеджменту природних ресурсів [19].

Особливої уваги потребує правова основа взаємовідносин. Аналіз діючої практики реалізації договірних зобов'язань у галузі екосистемних послуг у межах прибережних захисних смуг міста, зокрема через оператора земель водного фонду, свідчить про певну недосконаліть змістовної частини існуючих форм договорів. На сьогодні вони визначаються загальним підходом щодо ціноутворення, а також вони не достатньо деталізують специфічні умови експлуатації прибережних зон. В додатках до договорів відсутні обґрунтовані механізми розрахунку вартісної складової на різні види рекреаційних послуг, що надаються. Не зазначений в договорах обов'язок суб'єкта господарювання проведення періодичного екологічного моніторингу, заходів ревіталізації біоресурсів, зокрема підтримання еколого-гідрологічного балансу водойм, створює ситуації, що негативно впливають на об'єктивність ціноутворення, надання якісного рекреаційного продукту та забезпечення екологічної безпеки [6].

Актуалізація дослідження окреслюється значимістю використання формульного інструментарію ціноутворення, що дозволить збалансувати фінансові інтереси оператора рекреаційних послуг, суб'єкту господарювання із вимогами природоохоронного законодавства, що є ключовим фактором сталого використання водних об'єктів на екологічних засадах.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження відповідає пріоритетам державної політики, визначеними у Водній стратегії України на період до 2050 р. [3] та реалізує стратегічну мету впровадження економічних інструментів управління водними ресурсами на принципах повного відшкодування витрат на водні рекреаційні послуги. Має зв'язок із державною стратегією регіонального розвитку на 2021-2027 рр. (постанова КМУ від 05.08.2020 № 695) в частині дослідження рекреаційного потенціалу територій, акваторій та збереження їх екосистем [12].

На міському рівні дослідження є інструментом виконання «Стратегії розвитку м. Києва» [17] в рамках цільової програми «Дніпровська перлина», що передбачає перетворення прибережних територій на еколого-орієнтований громадський простір у відповідності до комплексної міської цільової програми екологічного благополуччя міста Києва (рішення Київради від 15.12.2022 № 5892/5933), забезпечуючи фінансову базу для оздоровлення київських водойм та модернізації пляжного господарства.

У екологічному та економічному аспектах дослідження відповідає положенням Закону України «Про основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року» про включення екологічної ренти у структуру тарифу [15].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У наукових працях В. Данильчука [5] та Є. Мішеніна [13] немає обґрунтування термінології у сфері монетизації водних рекреацій. Більшість дослідників [9, 10] оперують загальними поняттями про рекреаційний потенціал або туристичні послуги на водних об'єктах. Науковий аналіз термінології ускладнюється тим, що чинний Водний кодекс України не містить чіткого визначення рекреаційної діяльності на водних об'єктах, як комплексної послуги, обмежуючись лише поняттям загального водокористування.

У працях М. Степанова [16] та І. Синякевич [17] зазначається необхідність впровадження до процедури ціноутворення коефіцієнту привабливості ландшафту, де ціна послуги залежить від ступеня пейзажності та транспортної доступності.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Потребує розроблення термінологічний стандарт (глосарій) при забезпеченні та реалізації договірних відносинах між оператором рекреаційних послуг на воді та іншими суб'єктами господарювання.

Не розв'язана до сьогодні проблема картографічного забезпечення. Додатки відповідної договірної документації, що є складовою частиною відповідних договорів, мають умовно-схематичний тематичний зміст. Не зважаючи на те, що зазначається прив'язка до координат, але не точним є місце розташування і контури об'єктів рекреаційного призначення. На схемах немає актуальної позначки урізу води. Це призводить до не тарифікованого використання додаткових площ, наприклад, водного дзеркала та прилеглих територій суб'єктами господарювання. Без точної картографічної фіксації контурів рекреаційної зони не можливим є розрахунок собівартості утримання рекреаційного об'єкта та, відповідно, вартості його експлуатації [11].

Поза увагою залишається механізм ціноутворення, що залежить від сезонних та соціальних факторів. В умовах м. Києва попит на водну рекреацію має сезонний характер із піками активності влітку. Проте цінова політика залишається не змінною протягом усього сезону, що з точки зору ринкової економіки призводить до її не рентабельності. Не вирішеною частиною є розробка єдиної формули ціноутворення рекреаційної одиниці послуг на водних об'єктах міста.

Новизна. Сформулювана наукова дефініція «Акваторіально-територіальний рекреаційний комплекс» та розрахунковий принцип ціноутворення екосистемних послуг у сфері рекреаційної діяльності на водних об'єктах (на прикладі Київського регіону).

Методологічне або загальнонаукове значення. Розроблені спеціальні підходи, що забезпечують справедливе ціноутворення на рекреаційні водні послуги. Вони передьачають обов'язкове проведення

еколого-географічного експедиційного рекогносцирування акваторіально-територіального рекреаційного комплексу (далі – АТРК) на предмет фотодокументування рекреаційної території та стан об'єктів туристсько-рекреаційного призначення, ідентифікація та інтерпретація на відповідних панорамних та об'єктних знімках складових АТРК із подальшим їх геоінформаційним картографуванням. Під час оцінюючого вивчення території необхідно застосовувати цифровий інструментарій Smart-застосунків.

Викладення основного матеріалу. Термінологічний апарат (глосарій) розроблено на основі положень Водного кодексу України [2], Земельного кодексу України [8] та Водної стратегії України [1], а також результатів сучасних економіко-правових досліджень [1, 4, 9]. Визначення мають трактування адаптоване до специфіки рекреаційної діяльності на водних об'єктах м. Києва [10]. Словник складається із 27 визначень, важливим з яких є наступна дефініція.

Акваторіально-територіальний рекреаційний комплекс – це частина природно-антропогенного ландшафту, який включає акваторії водних об'єктів та прилеглий суходіл прибережних територій, що мають значний природно-оздоровлювальний потенціал зумовлений мінімальним впливом техногенного середовища на його довкілля, що сприяє виникненню господарської діяльності у сфері туристсько-рекреаційних послуг на екологічних засадах.

Інші термінологічні визначення глосарію доповнюють і розширюють змістовні складові рекреаційної діяльності на водних об'єктах з точки зору антропогенно-рекреаційного навантаження, благоустрою, вартості складових використання АТРК.

Проведено дослідження правових аспектів договірних зобов'язань сторін з фіксації організації рекреаційної діяльності на водних об'єктах. Проаналізовано угоди оператора земель водного фонду із 53 суб'єктами господарської діяльності. Результати аналізу вміщують:

– *час дії договору*: кінцевий термін один – до 31.12.2025 р., але дата початку – різна. Це означає, що час дії договору не впливав на вартість послуги;

– *визначення місцерозташування організованого короткострокового відпочинку*: в 12 документах адреса і фактичне місцерозташування не відповідає картосхемі або номеру, адреси немає або локація на картосхемі подається схематичним умовним позначенням «зірка». В одному з договорів від 19.05.2025 місцем рекреації є заболочене озеро із низинними очеретяними берегами;

– *кількість об'єктів рекреації*: в 14 договорах встановити локації не можливо, бо не зазначаються;

– *розмір плати за послуги фіксації місця організації рекреаційної діяльності*: за 408 об'єктів рекреаційного призначення у 2025 р. Оператор земель водного фонду отримав дохід у розмірі 2935000,00 грн. Максимальна сума у розмірі 180000 грн, в одному договорі ціна не встановлена;

– *фактологічний розрахунок ціни одиниці рекреаційної діяльності:* розраховується, як сумарний прибуток поділений на кількість об'єктів. Середня ціна одного об'єкта рекреаційного призначення становила 7193,62 грн;

– *розрахунок стартової ціни на право рекреаційного використання (АТРК) за розробленими формулами (1-4)*: встановив за відповідною кількістю сумарний дохід у розмірі 260978,77 грн, а середня ціна одного об'єкта становила 639,65 грн. Максимальна сума у розмірі 14850,00 грн, мінімальна – 3,37 грн;

– *примітки, тощо*: зазначається розрахована за формулами (1-4) базова ціна з коефіцієнтами піковості, ландшафтності та дефіциту. У деяких договорах вказані додаткові платіжні зобов'язання.

У договорах виявлений ряд неповної інформації, що стосується відсутності розрахункової формули вартості одиниць рекреаційних об'єктів, немає кореляції цінової політики в залежності від топографічних та гідрографічних особливостей АТРК, також не повна база геопросторових даних. Це умовні зображення об'єктів рекреаційної діяльності на планах.

Для наукового обґрунтування стартового (первинного) ціноутворення допускається врахування дійсної кількості рекреаційних об'єктів, але вже при розробці методики монетизації необхідно враховувати також площу рекреаційної зони, обслуговування якої покладається на суб'єкта господарювання. У додатках до договорів оператору необхідно обов'язково зазначати геоінформаційно верифіковану геопросторову інформацію беручи за основу офіційну картографо-геодезичну та землевпорядну документацію, наприклад геопортал Публічної кадастрової карти України, а не відкриті картографічні сервіси. Картосхема (детальний план території) повинен містити растрове геозображення з умовними позначеннями об'єктів рекреаційного призначення у відповідності до тексту договору, каталог координат контурних точок із позначенням абсолютної висоти урізу води об'єкту гідрографії, максимального та мінімального висотного позначення ділянки суходолу (наприклад, мінімально у такому форматі: 50.490743^0, 30.514697^0, 110,231 м.).

Правові наслідки геопросторової спрощеності контурів полягають в тому, що неможливо розрахувати комплексну сумарну собівартість рекреаційного господарювання. Це робить будь-яку методику ціноутворення апріорі не повною і дозволяє суб'єкту господарювання довільно використовувати більшу територію/акваторію АТРК, ніж це передбачено або не прописано у договорі без додаткової оплати. Також забезпечення екологічної безпеки без картосхеми створює потенційні ризики неможливості контролю дотримання режиму прибережних захисних смуг у відповідності до ст. 89 Водного кодексу [2].

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

З метою вивчення додатків № 1 до договорів про фіксацію організації рекреаційної діяльності 09.03.2026 р. було організовано виїзне рекогносцирування місцевості суб'єкта господарювання. Використовувалися Android-застосунки: «Geodesy», «Geodezist» та «OSMAnd», обстежена ділянка суходолу із місцем активної масової рекреації у водозахисній смузі іхтеологічного заказника «Озеро Вербне» (Дзеркалка) каскаду озер Опечень палеорусла р. Почайної Оболонського району м. Києва.

Під час експедиції створений колаж п'яти фотографічних геопанорамних знімків території рекреації. Знімки зорієнтовані за сторонами світу та мають індентифікаційні підписи. Означений перелік об'єктів (замість 12 об'єктів рекреації в договорі). На світлинах, одна з них на рис. 1 та на місцевості ідентифіковані (виявлені): 17 альтанок, 1 стаціонарний мангал, санітарна кабіна (WC), сітчаста огорожа-обнесення, 8 вогнестійких споруд на фундаменті, спостережна вежа човнової станції, 1 дерев'яний кемпінговий будинок у формі літери «Л», 13 вуликів, 5 підсобних споруд, спостережна тумба пляжу, дерев'яний будинок на березі озера. Детальний план розміщення об'єктів рекреаційної інфраструктури в масштабі 1 : 300 представлений на рис. 2.

На основі аналізу отриманих договорів не можливо визначити формулу ціноутворення, тому в основу розрахункової моделі визначення вартості рекреаційної послуги покладається базова ціна інтегральної функції витрат обслуговування та коефіцієнти рівня попиту, екологічної привабливості та обмеження [14].

Розрахунок оптимальної кількості рекреантів у водозахисній смузі водних об'єктів м. Києва розраховується, як оптимальна кількість рекреантів, що визначається через місткість (R_c) та прогноз завантаженості:

$$N_{opt} = R_c * T * K_{load}, \quad (1)$$

де: R_c – 8 осіб (місткість альтанки), T – 30 днів (місяць), K_{load} – коефіцієнт завантаження у високий сезон (наприклад, 0,7 або 70 % часу, враховуючи вихідні та будні).

Формула стартової ціни рекреаційного використання АТРК складається з наступних компонентів [18]: сумарні витрати на екологічну безпеку (базова ціна) помножена на рентні націнки (коефіцієнти). Тоді комплексна формула ціни (S_{lot}) має вигляд:

$$S_{lot} = \sum (C_b + V_{eco} + V_{gtb}) \times (1 + K_{ins}) \times K_{met}, \quad (2)$$

де, K_{met} – зведений коефіцієнт ринкової атрактивності (привабливості АТРК), який розраховується окремо за формулою:

$$K_{met} = K_{sez} \times K_{pr} \times K_{id}, \quad (3)$$

тоді, формула (2) має остаточний вигляд:

$$S_{lot} = \sum (C_b + V_{eco} + V_{gtb}) \times (1 + K_{ins}) \times \times (K_{sez} \times K_{pr} \times K_{id}), \quad (4)$$



Рис. 1. Одна з 5 світлин інтерпретаційного фотозвіту рекогносцирування території організації рекреаційної діяльності за Договором № 250/2025



Рис 2. Детальний план рекреаційної інфраструктури за матеріалами інтерпретаційного фотозвіту рекогносцирування території організації рекреаційної діяльності

де, C_b – базові витрати, які встановлюються оператором щосезону. Це мінімальна вартість утримання території та податки; V_{eco} – витрати на екологічну безпеку та санітарний моніторинг; V_{gtb} – витрати на гідротехнічну безпеку (амортизація споруд); K_{ins} – страховий коефіцієнт (резерв на випадок збитків від несприятливих природних явищ, руйнування внаслідок падіння БПЛА чи влучання ракети або її уламків), амплітуда значень варіюється від 0…0,05 (0…5 % до базової ціни); K_{sez} – коефіцієнт сезонності/піковості (травень-вересень), варіація значень сягає від 0…2,5; K_{pr} – коефіцієнт престижності/пейзажності (гедоністичність локації), варіація значень становитиме від 0…1,4; K_{id} – коефіцієнт інфраструктурного дефіциту (націнка при відсутності комерційної конкуренції) із варіацією значень від 0…1,2.

Приклад розрахунків 1. Вихідні дані: рекреаційний об'єкт – пляжна зона з причалом площею 1 га; рекреаційний період: теплий сезон року (травень-вересень). Необхідно розрахувати стартову ціну лоту для аукціону на право рекреаційного використання АТРК.

Перший етап розрахунків – це розрахунок базової ціни: C_b (оренда землі та адмінвитрати) = 1000 грн/добу (2025 р.).; V_{eco} (прибирання, аналізи води, ціна встановлюються оператором щосезону) = 500 грн./місяць (2025 р.); V_{gtb} (обстеження донної поверхні та ремонт інфраструктури, вартість також встановлюються оператором щосезону) = 3000 грн/сезон (2025 р.). Разом *базова ціна становить:* $\sum = 4500$ *грн.*

Другий етап розрахунків – розрахунок коефіцієнтів: K_{ins} (страховий коефіцієнт на випадок форс-мажорних обставин) = 0,05 (5 % до базової ціни); K_{sez} (сезонність активної рекреації з травня по вересень) = 2,5 (коефіцієнт пікового попиту); K_{pr} (коефіцієнт пейзажності ландшафту та престижності місця відпочинку) = 1,4 (наприклад, краєвид на об'єкти історико-культурної спадщини, чиста вода, логістика тощо); K_{id} (коефіцієнт дефіцитності рекреаційної послуги) = 1,2 (наприклад, якщо АТРК облаштований за європейськими стандартами і має відзнаку «блакитний прапор»). Розрахунок базової ціни з коефіцієнтами: $Б_c = 4\ 500 \times (1 + 0{,}05) = 4\ 500 \times 1{,}05 = 6\ 750$ *грн.*

Розрахунок зведеного коефіцієнту: $K_{met} = 2{,}5 \times 1{,}4 \times 1{,}2 = 4{,}2$. Таким чином, підсумкова стартова ціна лота становить: $S_{lot} = 6\ 750 \times 4{,}2 = 288250$ *грн/сезон*. Висновок з розрахунків: ціна лота формується як покриття витрат на безпеку (189 тис. грн) з мультиплікатором ринкової цінності (4,2), що враховує високу рентабельність у літній період та унікальність ландшафту.

Методика розрахунку ціноутворення екосистемних послуг на водних об'єктах міста Києва базується на трьох рівнях розрахунку: обчислення базової ціни на сезон, яка гарантує беззбитковість об'єкта та його екологічну безпеку для рекреантів. Коридори

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

коригування ринкового рівеня кінцевої ціни враховують попит та сезонність: для високого сезону (травень-вересень) становить у діапазоні 1,5 – 2,0, наприклад, для центральних рекреаційних зон (Гідропарк, Оболонь, Венеціянська протока) становить 1,3 – 1,8.

Приклад розрахунків 2. Вихідні дані: рекреаційний об'єкт – відпочинкова зона АТРК «Озеро» (умовна назва); рекреаційний період: найтепліший місяць сезону року (липень). Необхідно розрахувати вартість лоту оренди за місяць одиниці рекреаційного місця на одну особу. Дані для розрахунку знаходимо за формулою 1: C_{tot} = 12 000 грн. (сума всіх витрат на обслуговування зони відпочинку); N_{opt} – альтанка на 8 осіб здається 20 разів на місяць (70 % завантаження). Розрахунок: N_{opt} = *8 осіб × 20 разів = 160 людино/днів*. Базова ціна на одну особу: C_b = *12000 : 160 = 75 грн./особу*.

Формування кінцевої ціни. Оскільки це високий сезон (травень-вересень), застосовується коефіцієнт сезонності (*S*) та норма рентабельності *(R)*. При *r =30 %*, а *S = 1,5* (націнка за піковий попит): *P = 75 *1,3 *1,5 = 146, 25 грн/особу*. Для групи з 8 осіб ціна оренди альтанки на день складе: *146,25 * 8 ≈ 1170 грн*.

Базова ціна рекреаційної послуги на одну особу для альтанки біля озера обчислюється шляхом поділу сукупних експлуатаційних та екологічних витрат (C_{tot}) на планову кількість відвідувачів (N_{opt}), яка розраховується з урахуванням місткості (8 осіб) та високого сезону.

Висновки. Запроваджено нову наукову дефінцію екосистемних послуг – «Акваторіально-територіальний рекреаційний комплекс». АТРК – специфічне просторове утворення, де правовий статус водного дзеркала та прибережної території рекреаційної зони формує контрольовану зону системи регульованих господарських відносин функціонування природно-територіального комплексу міста.

Окрему увагу приділено розв'язанню проблеми картографічного забезпечення договірної документації. Зазначено, що використання умовно-схематичних додатків без точної прив'язки до геодезичних координат та відсутність позначення урізу води на планах створює умови для довільного використання додаткових площ акваторій, які, з цінової точки зору, не тарифікуються. Впровадження точної картографічної фіксації контурів рекреаційних зон є обов'язковою умовою для детального розрахунку собівартості утримання об'єктів та встановлення обґрунтованої вартості рекреаційних послуг.

Розроблені формули розрахунку, функціонал яких дозволяє визначити економічно обґрунтовану систему ціноутворення екосистемних послуг рекреаційної діяльності на водних об'єктах. Вона враховує витрати на інфраструктуру, рекреаційне навантаження, попит, сезонність та екологічні фактори. Наприклад, під час розрахунку стартової ціни лоту для аукціону на право рекреаційного використання АТРК розраховується базова ціна на кожний сезон окремо відповідно до складових формули (2). Коефіцієнти формули обираються оператором земельного водного фонду, як варіаційна складова розрахунку у діапазонах визначених у формулах 3-4 та обирає свої діапазони піковості (0…2,5); ландшафтності (0…1,4) та попиту/дефіциту (0…1,2) щомісяця.

Перспективи використання результатів дослідження. Проведення подальших ґрунтовних досліджень потребує напрацювання проєкту нормативно-правового акту стосовно методичних рекомендацій розроблення територіальної організації АТРК, туристсько-рекреаційного використання та охорони відповідних акваторій та територій. Зазначені методичні рекомендації мають бути науково-практично апробовані на одній з локацій інтенсивного рекреаційного використання АТРК м. Києва.

Рекомендуються до імплементації в діяльність операторів земель водного фонду міст України розроблений комплекс формул ціноутворення. Це дозволить ефективно відшкодовувати затрати на водні послуги, передбачені у Водній стратегії України до 2050 р. Практичне впровадження таких розрахунків дозволить створити прозору модель «ціна – якість – довкілля», що забезпечить фінансову рентабельність операторів земель водного фонду міст України, створить умови для перетворення гідрографічної мережі урбанізованих територій на якісний та безпечний громадський простір.

Література

1. *Водна стратегія України на період до 2050 року:* Розпорядження Кабінету Міністрів України від 09.12.2022. № 1134-р.
2. *Водний кодекс України:* Кодекс від 06.06.1995 № 213/95-ВР (в редакції від 01.01.2025). ВВРУ. 1995. № 12/234. С. 21.
3. *Гірняк С. М.* Математична логіка та теорія алгоритмів: навчальний посібник. Львів, 2023. 280 с.
4. *Гринчишин Н. М.* Екологічна безпека водних об'єктів урбанізованих територій. Монографія. Львів, 2022. 310 с.
5. *Данильчук В. С.* Рекреаційне природокористування в умовах мегаполіса: стратегії монетизації. К., 2023. 320 с.
6. *Екологічна безпека України*: системний аналіз перспектив покращення. К.: НІСД, 2022. 140 с.
7. *Закон України «Про благоустрій населених пунктів»* від 06.09.2005 № 2807-IV (в редакції 2024 р.).
8. *Земельний кодекс України:* Кодекс від 25.10.2001 № 2768-III (в редакції від 01.01.2025).
9. *Касьянова Н. В.* Моделювання динаміки попиту на рекреаційні послуги в умовах сезонності: Монографія. К., 2022. 240 с.
10. *Комплексна міська цільова програма екологічного благополуччя міста Києва на 2022–2025 роки*. К., КМДА, 2022. 120 с.
11. *Ларка Л. С.* Алгоритми формування цін на муніципальні рекреаційні послуги: Монографія. Харків, 2022. 195 с.
12. *Методичні вказівки до розробки планів управління річковими басейнами в Україні*. К., 2023. 140 с.

13. *Мішенін Є. В.* Екологічна логістика в системі рекреаційного природокористування: Монографія. Суми, 2023. 295 с.
14. О*снови математичного моделювання економічних систем*: алгоритми та формули: Монографія / Заг. ред. проф. М. В. Коробова. К., 2023. 215 с.
15. *Синякевич І. В.* Екологічна політика: економічні важелі сталого розвитку: Монографія. К.: Наукова думка, 2021. 400 с.
16. *Степанов М. О.* Екологічна рента у системі ціноутворення на природні ресурси: Монографія. Одеса: Фенікс, 2022. 280 с.
17. *Стратегія розвитку міста Києва до 2025 року* (у редакції від 2024 року). К.: КМДА. 2025. 140 с.
18. *Чигрин О. Ю.* Екологічно орієнтоване господарювання у прибережних смугах: Монографія. Суми, 2023. 310 с.
19. *Яремчук В. О.* Рекреаційно-туристичний потенціал водних об'єктів Київщини: Монографія. К., 2023. 165 с.

Дата першого надходження статті до видання: 30.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

ЕКОЛОГІЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ

УДК 504.064.3:582.29(477.42)
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.8

ЛІХЕНОІНДИКАЦІЙНА ОЦІНКА СТАНУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ В УМОВАХ УРБАНІЗОВАНОГО СЕРЕДОВИЩА

Мельник-Шамрай В.В., Давидова І.В., Курбет Т.В., Дідківська Ю.А., Дем'янчук В.І., Марчук К.О.
Державний університет «Житомирська політехніка»
вул. Чуднівська, 103, 10005, м. Житомир
org_vvm@ztu.edu.ua

У статті представлено результати ліхеноіндикаційної оцінки стану атмосферного повітря в урбанізованому середовищі міста Житомир. Дослідження проводилися на восьми пробних ділянках, закладених у різних функціональних зонах міста з урахуванням рівня транспортного навантаження. Оцінювання якості повітря здійснювали за допомогою індексу чистоти повітря (ІЧП) Ле Блана та Де Слооверана основі аналізу видового складу, частоти покриття-трапляння та проективного покриття епіфітних лишайників. Найбільша кількість накипних і листуватих лишайників зафіксована на липі серцелистій, березі повислій, сосні звичайній та гіркокаштані звичайному. Кущисті лишайники були відмічені виключно на сосні звичайній. Відповідно до поширення лишайників деревні породи можна розташувати у зростаючому порядку за кількістю епіфітної ліхенобіоти таким чином: клен звичайний < тополя біла < сосна звичайна < гіркокаштан звичайний < липа серцелиста < береза повисла. Виявлено чітку просторову диференціацію видового різноманіття лишайників: від 1–5 видів у центральних та транспортно навантажених районах до 8–9 видів на периферії міста. Зафіксовано зменшення видового різноманіття та проективного покриття лишайників у напрямі до центральної частини міста, що свідчить про прояв «міського ефекту» та формування зон із підвищеним рівнем антропогенного впливу. За результатами розрахунку індексу чистоти повітря у межах міста виділено чотири ізотоксичні ліхеноіндикаційні зони. До сильно забрудненої зони (ІЧП = 1,0–4,9) віднесено дослідні ділянки № 5, № 7 та № 8. Середньо забруднена зона (ІЧП = 5,0–9,9) представлена окремими осередками на вулицях Покровській (ділянка № 4) та Івана Гонти (ділянка № 6). Слабко забруднена зона (ІЧП = 10,0–14,9) характерна для дослідної ділянки № 1, тоді як незабруднена зона (ІЧП = 15 і більше) зафіксована на ділянках № 2 та № 3. Отримані результати підтверджують тісний зв'язок між станом атмосферного повітря та інтенсивністю антропогенного навантаження, насамперед транспортного. Використання ліхеноіндикації дозволило виявити просторові закономірності забруднення та оцінити кумулятивний вплив полютантів на міські екосистеми, що робить даний метод ефективним інструментом екологічного моніторингу. *Ключові слова: ліхеноіндикація*, атмосферне повітря, ліхенобіота, еколого-токсикологічний підхід, індекс чистоти повітря, урбанізоване середовище, антропогенне навантаження.

Lichenoindication assessment of atmospheric air condition in an urbanized environment. Melnyk-Shamrai V., Davydova I., Kurbet T., Didkivska Y., Demianchuk V., Marchuk K.

The article presents the results of a lichen indication assessment of the atmospheric air quality in the urban environment of the city of Zhytomyr. The study was conducted at eight sampling sites established in different functional zones of the city, taking into account the level of traffic load. Air quality was assessed using the Index of Atmospheric Purity (IAP) proposed by Le Blanc and De Sloover, based on the analysis of species composition, frequency of occurrence, and projective cover of epiphytic lichens. The largest number of crustose and foliose lichens was recorded on Small-leaved Lime (Tilia cordata), Silver Birch (Betula pendula), Scots Pine (Pinus sylvestris), and Horse Chestnut (Aesculus hippocastanum). Fruticose lichens were noted exclusively on Scots Pine. According to lichen distribution, tree species can be arranged in increasing order by the quantity of epiphytic lichenobiota as follows: Norway Maple < White Poplar < Scots Pine < Horse Chestnut < Small-leaved Lime < Silver Birch. A clear spatial differentiation of lichen species diversity was revealed: from 1–5 species in central and traffic-loaded areas to 8–9 species on the city outskirts. A decrease in species diversity and projective cover of lichens toward the central part of the city was recorded, indicating the manifestation of the "urban effect" and the formation of zones with an increased level of anthropogenic impact. Based on the calculation of the Index of Air Purity, four isotoxic lichenoindication zones were identified within the city. Plots №5, № 7, and №8 were assigned to the heavily polluted zone (IAP = 1.0–4.9). The moderately polluted zone (IAP = 5.0–9.5) is represented by separate pockets on Pokrovska Street (plot №. 4) and Ivan Gonta Street (plot № 6). The weakly polluted zone (IAP = 10.0–14.9) is characteristic of experimental plot № 1, while the unpolluted zone (IAP = 15 and more) was recorded on plots № 2 and № 3. The obtained results confirm a close relationship between the state of atmospheric air and the intensity of anthropogenic pressure, primarily from transport. The use of lichen indication made it possible to identify spatial patterns of pollution and assess the cumulative impact of pollutants on urban ecosystems, making this method an effective tool for environmental monitoring. *Key words:* lichen indication, atmospheric air, lichen biota, ecological and toxicological approach, index of atmospheric purity, urban environment, anthropogenic pressure.

© Мельник-Шамрай В.В., Давидова І.В., Курбет Т.В., Дідківська Ю.А., Дем'янчук В.І., Марчук К.О., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. Останніми роками в Україні фіксується істотне зростання антропогенного навантаження на навколишнє природне середовище, що спричиняє глибокі трансформації його структури. Серед численних негативних наслідків особливу увагу привертає стійке локальне забруднення атмосферного повітря – одного з ключових компонентів довкілля, від якості якого безпосередньо залежить здоров'я населення. У 2022 році до переліку актуальних і таких, що загострюються, екологічних проблем України додалася військова агресія. Воєнні дії вплинули на всі складові довкілля – флору і фауну, ґрунтовий покрив, водні ресурси та атмосферу. Наслідки цього впливу матимуть тривалий характер і проявлятимуться не лише на локальному, а й на глобальному рівнях. За таких умов зростає значення та актуальність моніторингових досліджень. Протягом останніх п'ятдесяти років у системі екологічного моніторингу особливе місце посідає біоіндикація, оскільки вона має акумулюючий характер, відображаючи усереднений багаторічний стан екосистем. Проведення повторних досліджень дає змогу простежити динаміку забруднення урбанізованих територій у часі.

Об'єкти біоіндикації повинні відповідати низці вимог, зокрема бути широко поширеними, приуроченими до певних умов існування та мати відносно тривалий життєвий цикл. Лишайники повністю відповідають цим критеріям. Їх використання як індикаторів зумовлене унікальною та високочутливою реакцією на дію стресових чинників. Лишайники є токсикотолерантними організмами, здатними акумулювати значні кількості забруднювальних речовин у слані та формувати характерні угруповання видів. Багато з них демонструють специфічну реакцію на різні типи полютантів, що дає можливість визначати не лише рівень, а й характер забруднення. Таким чином, як складова біогеоценозів, лишайники відзначаються високою чутливістю до навіть незначних змін довкілля та можуть ефективно використовуватися як індикатори цих змін. На сьогодні розроблено й упроваджується низку ліхеноіндикаційних підходів до оцінювання якості повітря, серед яких одним із найпоширеніших і найбільш інформативних є метод розрахунку екологічних індексів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Охорона довкілля та раціональне використання природних ресурсів є ключовими складовими сталого розвитку України. Особливо актуальними залишаються проблеми забруднення природного середовища в межах урбанізованих територій, що зумовлені діяльністю промислових підприємств і транспортної інфраструктури. У цьому контексті біоіндикація посідає важливе місце в системі екологічного моніторингу, оскільки дає змогу оцінювати рівень та динаміку антропогенного навантаження на міські екосистеми.

Численні дослідження засвідчують, що одними з найінформативніших біоіндикаторів стану атмосферного повітря є деревні рослини та лишайники [1, 2]. Висока чутливість лишайників до забруднення пояснюється їх симбіотичною природою, фізіологічними особливостями та безпосереднім контактом з атмосферним повітрям і опадами [3, 4]. Навіть тривала дія низьких концентрацій шкідливих речовин спричиняє незворотні ушкодження талому лишайників, що зумовлено повільним оновленням їх клітин. Особливо тісний зв'язок встановлено між станом ліхенофлори та концентрацією діоксиду сульфуру в повітрі [4, 5]. Окрім цього, лишайники здатні акумулювати важкі метали та реагувати на оксиди Нітрогену, озон, фториди й інші полютанти навіть за низьких концентрацій [6].

За екологічною приуроченістю лишайники поділяють на епіфітні, епіксильні, епігейні та епілітні, серед яких найбільш чутливими до атмосферного забруднення є епіфітні види [7–10]. За морфологічною будовою виділяють накипні, листуваті та кущисті лишайники, чутливість яких до забруднення зростає у цьому ж порядку. Відсутність кущистих лишайників або збіднення видового складу загалом розглядається як індикатор високого антропогенного навантаження [11]. Зміни у ліхенофлорі під впливом забруднення повітря зумовлені різною чутливістю видів до полютантів [11, 12]. Виділяють два основні механізми впливу: по-перше, поглинання токсичних речовин таломом із подальшими змінами його хімічного складу (зокрема під дією нітратної та сульфатної кислот); по-друге, руйнування талому без накопичення речовин, особливо під впливом хлорвмісних сполук у поєднанні з кислотами, концентрація яких зростає у вологий зимовий період.

Висока чутливість епіфітних лишайників пояснюється значною площею поглинання, гідрофільністю, довговічністю та здатністю акумулювати полютанти з атмосферних опадів [13]. Це стало основою концепції лишайникових зон («лишайникова пустеля», «зона змагання», «нормальна зона»), що відображають рівень забруднення повітря [14]. Загалом зі зростанням концентрації забруднювачів зменшуються різноманіття, чисельність і розміри лишайників, а також зростає вміст важких металів у їх тканинах, що дозволило розробити шкали ліхеноіндикаційної оцінки якості повітря.

У роботі [15] оцінювали стан природних екосистем поблизу промислового підприємства ПАТ «Сумихімпром», виокремлюючи ізотоксичні ліхеноіндикаційні зони та демонструючи зміни біоценозів у географічному профілі повітряного забруднення. Дослідники [16, 17] провели комплексну оцінку стану атмосферного повітря в урбанізованих районах Східної України, встановивши кореляції між даними ліхенових індикаторів та інструментальними вимірюваннями. У роботах [19, 20] представлено результати ліхеноіндикаційної оцінки атмос-

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

ферного повітря в декількох містах Півдня України, описано просторовий розподіл ліхеноіндикаційних зон та порівняння якості повітря між різними урбанізованими ландшафтами. У дослідженні [21] здійснено ліхеноіндикаційну оцінку стану атмосферного повітря м. Васильків (Київська область) на основі аналізу видового складу та просторового поширення епіфітних лишайників. Встановлено диференціацію території міста за рівнем антропогенного навантаження: виділено зони з різним ступенем забруднення повітря, що підтверджує ефективність використання лишайників як біоіндикаторів якості атмосферного середовища.

Узагальнюючи наведені дослідження, слід зазначити, що ліхеноіндикація є ефективним та інформативним методом оцінки стану атмосферного повітря в умовах різного рівня антропогенного навантаження. Отримані результати свідчать про можливість виділення просторово диференційованих зон забруднення, а також про наявність кореляцій між біоіндикаційними та інструментальними показниками якості повітря. Водночас, незважаючи на значну кількість досліджень у різних регіонах України, питання оцінки стану атмосферного повітря із використанням ліхеноіндикації залишається актуальним для окремих територій, зокрема Житомирської області, де подібні дослідження є обмеженими. Це зумовлює необхідність подальшого вивчення ліхенобіоти як чутливого індикатора змін довкілля та обґрунтовує доцільність проведення відповідних регіональних досліджень.

Метою статті є оцінка стану атмосферного повітря в місті Житомир за допомогою ліхеноіндикаційного методу, визначення рівня антропогенного навантаження та виявлення просторових особливостей забруднення на основі аналізу видового складу, поширення і стану лишайників. Об'єктом дослідження є епіфітні лишайники, що зростають на деревах досліджуваної території та використовуються як індикатори якості атмосферного повітря. Предметом дослідження є якісні та кількісні характеристики лишайникового покриву дерев, а також стан забруднення атмосферного повітря міста Житомир.

Новизна одержаних результатів полягає у проведенні комплексної ліхеноіндикаційної оцінки стану атмосферного повітря міста Житомир, встановленні особливостей просторового розподілу лишайникового покриву в умовах урбанізованого середовища та уточненні залежності між видовим різноманіттям епіфітних лишайників і рівнем антропогенного навантаження. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання результатів дослідження для екологічного моніторингу якості атмосферного повітря в місті Житомир, розробки природоохоронних заходів, а також у освітньому процесі при викладанні екологічних дисциплін.

Методика досліджень. Матеріалами для роботи слугували описи лишайникових угруповань на пробних ділянках та власні ліхенологічні збори, здійснені впродовж 2024–2025 рр. Всього на території міста було закладено 8 пробних ділянок, на яких за маршрутним методом досліджено близько 80 дерев різних видів Для проведення дослідження було обрано такі деревні види: липа серцелиста (*Tilia cordata* Mill.), сосна звичайна (*Pinus sylvestris* L.), тополя біла (*Populus alba* L.), клен звичайний (*Acer platanoides* L.), береза повисла (*Betula* sp.), гіркокаштан звичайний (*Aesculus hippocastanum*). Для ідентифікації видів лишайників використовували низку визначників і монографій [11, 22].

Дослідження лишайникового покриву здійснювали на прямостоячих, добре освітлених деревах, переважно з південного боку стовбура. Для кожного дерева проводили опис епіфітних лишайників у прикореневій частині стовбура та на висоті 60–130 см. Площа облікової ділянки становила 10×10 м, у межах якої для біоіндикаційних спостережень відбирали 10 старих, здорових, поодиноко розташованих дерев. Дослідження виконували відповідно до методики [11]. Проєктивне покриття лишайників на пробних майданчиках визначали методом «лінійних перетинів» із подальшим обчисленням середніх значень для досліджуваної території. У роботі використовували прозору палетку розміром 10×10 см, поділену на квадрати площею 1 см², за допомогою якої оцінювали ступінь покриття поверхні стовбура лишайниками. Під час прикладання рамки до стовбура підраховували кількість повних і частково заповнених квадратів, зайнятих лишайниками (рис. 1).

Для встановлення сучасного рівня забруднення атмосфери цих територій розраховували індекс чистоти повітря Ле Блана та Де Слоовера (ІЧП. або I.A.P. – від англ. «index of air purity») за формулою [11, 23, 24]:

$$ІЧП=\sum_{i=1}^{n}\frac{Q_i \cdot f_i}{10} \quad (1)$$

де n – кількість видів лишайників на досліджуваній ділянці, Qi – екологічний індекс певного і-того виду (або індекс асоційованості чи токсикофобності), а fi – комбінований показник покриття-потрапляння (проєктивне покриття і-того виду в балах).

Показник Qi – середня кількість видів лишайників, виявлених поряд з таким видом на всіх досліджених ділянках у гомогенній за ступенем забруднення території. Чим більший цей показник, тим більше токсикофобний такий вид. Комбінований показник покриття-трапляння (fi) 10-бальний, визначався за шкалою: 1 – проєктивне покриття 1–3%; 2 – проєктивне покриття 3–5%; 3 – проєктивне покриття 6–10%; 4 – проєктивне покриття 11–20%; 5 – проєктивне покриття 21–30%; 6 – проєктивне покриття 31–40%; 7 – проєктивне покриття 41–50%; 8 – проєктивне покриття 51–60%; 9 – проєктивне покриття 61–80%; 10 – проєктивне покриття 81–100%.

Таким чином, чим більше проєктивне покриття лишайників і чим більше видів мешкає на цій ділянці



Рис. 1. Встановлення відсотку покриття лишайниками стовбура дерева

місцевості, тим вищий показник ІЧП. і, відповідно, тим чистіше повітря місця перебування. На основі розрахованих індексів (ІЧП.) було виділено ізотоксичні ліхеноіндикаційні зони [11]: 0–0,9 – лишайникова пустеля; 1–4,9 – сильно забруднена зона; 5,0–9,9 – середньо забруднена зона; 10,0–14,9 – слабко забруднена зона; 15 та більше – не забруднена зона.

Дослідні ділянки закладалися по місту з урахуванням різного транспортного навантаження (табл. 1).

Отримані експериментальні дані піддавали статистичній обробці з використанням програмного забезпечення Microsoft Excel 2010. Для кількісної оцінки рівня забруднення атмосферного повітря застосовували класичний індекс чистоти повітря Ле Блана і Де Слоовера (ІАР).

Виклад основного матеріалу. Основними джерелами забруднення повітря в Україні є: автотранспорт, промислові підприємства, енергетичні об'єкти (ТЕС, ТЕЦ), сільськогосподарська діяльність, будівництво та знесення будівель, пожежі, у тому числі спричинені військовими діями [25]. Основними забруднювачами атмосферного повітря за видами економічної діяльності традиційно для Житомирської області залишаються «Сільське, лісове та рибне господарство», «Переробна промисловість», «Добувна промисловість і розроблення кар'єрів», «Транспорт,

Таблиця 1

Порівняльна характеристика дослідних ділянок за умовами антропогенного навантаження

№ ділянки	Локація	Характеристика розташування	Рівень транспортного навантаження	Особливості території
1	проспект Миру	Виїзд з міста, поблизу кінцевої зупинки тролейбусів №2 та №3	Високий	Інтенсивний транспортний потік
2	вул. Чуднівська	Виїзд з міста, зупинка «Гідропарк»	Низький	Паркова зона, обмежений рух транспорту
3	вул. Праці	Околиця міста, район «Соколовський масив»	Дуже низький	Рекреаційна зона
4	вул. Покровська («У баби Іри»)	Міська територія	Середній–високий	Пікові навантаження в години пік
5	вул. Київська («Мар'янівна»)	В'їзд до міста	Високий	Інтенсивний транспортний рух
6	вул. Івана Гонти	Поблизу ПАТ «Житомирський маслозавод»	Середній	Промислова зона
7	вул. Київська («Поліський чай»)	Центральна магістраль міста	Високий	Значне транспортне навантаження
8	вул. Велика Бердичівська («Перша міська лікарня»)	Центральна частина міста	Високий	Інтенсивний рух транспорту

Джерело: створено авторами на основі аналізу територій дослідження

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

складське господарство поштова та кур'єрська діяльність», обсяг викидів забруднюючих речовин в атмосферу області зазначених галузей склав відповідно 33,47 %, 27,51 %, 14,91 % та 10,28 % [25].

За результатами звітів [25] встановлено, що загальний рівень забруднення атмосферного повітря в Житомирі у 2024 році оцінювався як низький, а середньорічні концентрації більшості домішок не перевищували середньодобових гранично допустимих концентрацій, за винятком діоксиду азоту. Зокрема, зафіксовано перевищення ГДК для діоксиду азоту, що свідчить про наявність локального антропогенного навантаження, тоді як інші показники залишалися в межах нормативних значень. Отримані дані створюють основу для подальшого дослідження стану атмосферного повітря в місті з використанням біоіндикаційних методів, зокрема ліхеноіндикації, яка дозволяє оцінити кумулятивний вплив забруднення на екосистеми.

З метою уточнення просторових особливостей впливу антропогенного навантаження на міське середовище було проведено ліхеноіндикаційне обстеження деревних насаджень на дослідних ділянках. За результатами обстеження кількох десятків дорослих прямостоячих дерев на дослідних ділянках було побудовано графік розподілу лишайників на різних деревних породах (рис. 2). Аналіз отриманих даних свідчить, що найчастіше лишайники траплялися на березі та липі, тоді як найменша їх кількість відмічена на клені й тополі. Відповідно, деревні породи за ступенем заселеності лишайниками можна розташувати у такій послідовності (у напрямі зростання кількості): Клен звичайний < Тополя біла < Сосна звичайна < Гіркокаштан звичайний < Липа серцелиста < Береза повисла. Просторова орієнтація лишайникових угрупувань також виявила певні особливості: найбільша їх концентрація спостерігалася на східних і південно-східних експозиціях стовбурів.

Відомо, що діяльність промислових підприємств і транспортної інфраструктури призводить до деградації природних біоценозів, унаслідок чого формуються техногенно трансформовані території та геохімічні аномалії. Підвищене навантаження автотранспорту впливає не лише на екосистеми, розташовані безпосередньо поблизу автомагістралей і транспортних вузлів, а й на більш віддалені ділянки. Особливо чутливими до антропогенного впливу є міські паркові зони, де поєднуються риси як прилеглих до джерел забруднення територій, так і відносно віддалених природних осередків. Стан таких екосистем значною мірою визначається інтенсивністю транспортних потоків, метеорологічними умовами, особливостями рельєфу, наявністю потужних промислових об'єктів та відстанню до них. Водночас спільною характеристикою цього впливу є поширення викидів автотранспортних засобів, їх осадження та накопичення шкідливих речовин у ґрунті й рослинних тканинах. Таким чином, використання методів біоіндикації дає змогу ефективно оцінювати вплив автотранспортного комплексу на стан міських екосистем і навколишнє природне середовище.

Ліхеноіндикаційні дослідження проводили в місті Житомир на різних дослідних ділянках, які характеризуються різним впливом автотранспорту (рис. 3). Оцінювання інтенсивності транспортного потоку на автошляхах, розташованих поблизу дослідних ділянок, здійснювали на основі власних польових спостережень. Упродовж періоду з 08:00 до 20:00 проводили підрахунок кількості транспортних засобів.

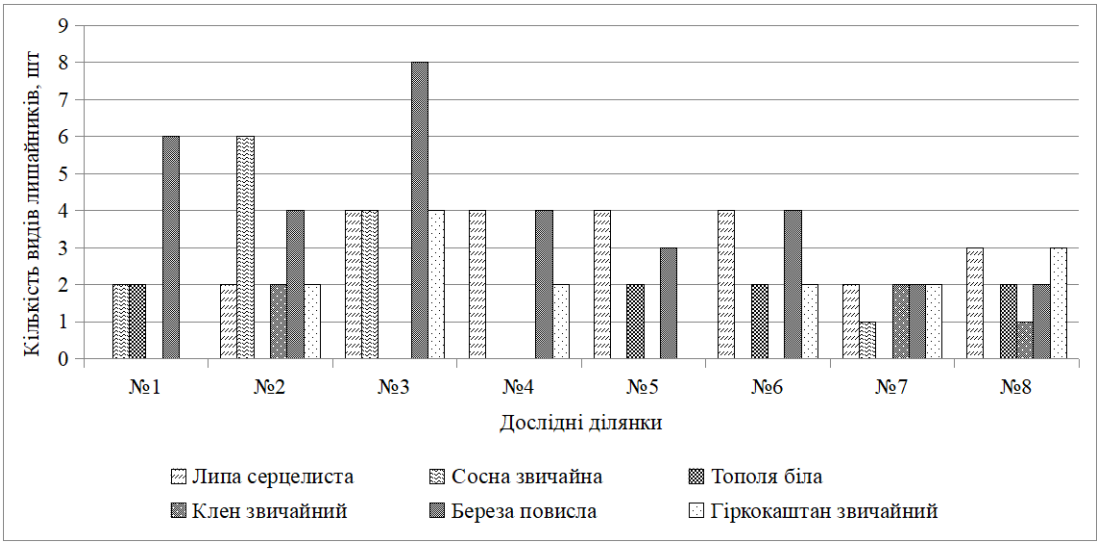


Рис. 2. Співвідношення видів лишайників до видового складу дерев

Джерело: створено авторами на основі власних досліджень

Відомо, що одним із суттєвих чинників негативного впливу на екосистеми є особливості руху автотранспорту, які включають не лише загальну інтенсивність потоку, а й зміну режимів руху транспортних засобів. Часті прискорення та гальмування призводять до істотного зростання обсягів викидів шкідливих речовин в атмосферне повітря, що, у свою чергу, зумовлює підвищене навантаження на природні екосистеми.

Аналіз видового різноманіття епіфітних лишайників у різних районах міста та на його околицях показав значну просторову варіабельність кількості видів у межах окремих пунктів спостережень (у перерахунку на 10 дерев). Так, у північно-західній частині та на більшості східних територій м. Житомир кількість видів на деревах у вуличних насадженнях становить від 1 до 5, тоді як у центральних, північно-східних і південних районах цей показник зростає до 6–7 видів, а на околицях досягає 8–9 видів. Загалом при наближенні від периферійних територій до центральної частини міста спостерігається зменшення видового різноманіття епіфітних лишайників та формування так званих «лишайникових пустель». Таким чином, для Житомира характерне явище збіднення епіфітної ліхенобіоти, відоме як «міський ефект».

Як видно з даних, наведених на рис. 4, на всіх дослідних ділянках домінують накипні та листуваті лишайники, тоді як кущисті трапляються найрідше. На ділянках №5, №6, №7 та №8 частка накипних форм суттєво перевищує кількість листуватих, що свідчить про підвищений рівень забруднення атмосферного повітря на цих територіях. Водночас на ділянках №2 та №3 частка накипних лишайників є найменшою, а співвідношення листуватих і кущистих форм – приблизно однаковим.

Крім того, було здійснено порівняльний аналіз дослідних ділянок зі схожими характеристиками транспортного навантаження. Так, для ділянок №2 та №3 характерна мінімальна інтенсивність руху автотранспорту, що підтверджується високою різноманітністю лишайників на стовбурах дерев (рис. 5а). На цих територіях у приблизно рівних частках представлені накипні та листуваті форми, а частка кущистих лишайників становить близько 20 %. Отримані результати свідчать про відносно високий рівень якості атмосферного повітря на зазначених дослідних ділянках.

Для дослідних ділянок № 4 та № 6 інтенсивність руху автотранспорту є помірною (рис. 5б). Отримані результати поширеності лишайників це підтверджують. Основну частку проективного покриття займають накипні лишайники на обох дослідних ділянках та становлять на №4 – 67 % та на № 6 – 60 %, що 1,5 та 2,0 разів більше порівняно з листуватими лишайниками відповідно до дослідних ділянок. Отже, можна стверджувати, що якість повітря на даних ділянках є сприятливою.

Під час аналізу проективного покриття лишайників на дослідних ділянках №1 та №8 (рис. 6а), які характеризуються високою інтенсивністю автотранспортного руху, встановлено, що саме на цих територіях зафіксовано найменшу кількість видів лишайників порівняно з іншими ділянками. На ділянці №8 частка накипних форм перевищує відповідний показник ділянки №1 у 1,4 раза, тоді як кількість листуватих лишайників тут є у 2,9 раза меншою від

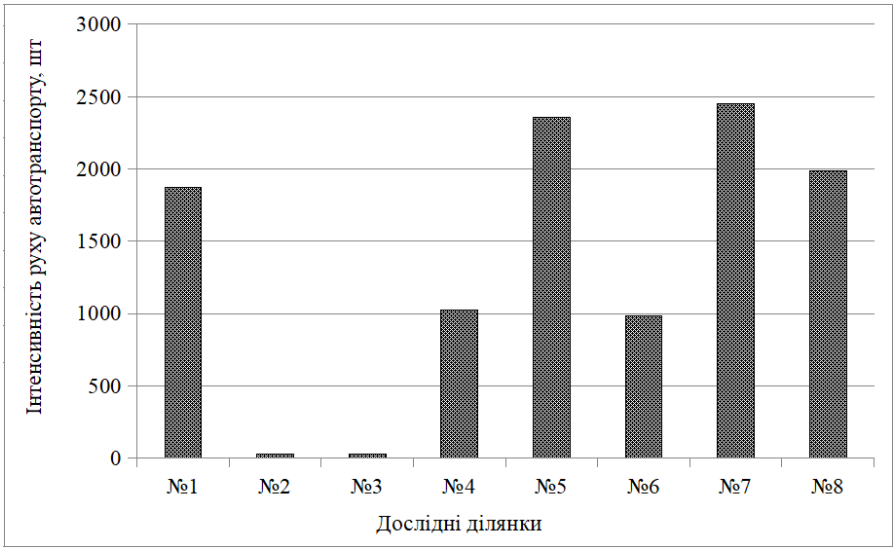


Рис. 3. Інтенсивність руху транспортних засобів поблизу досліджуваних територій

Джерело: створено авторами на основі власних досліджень

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

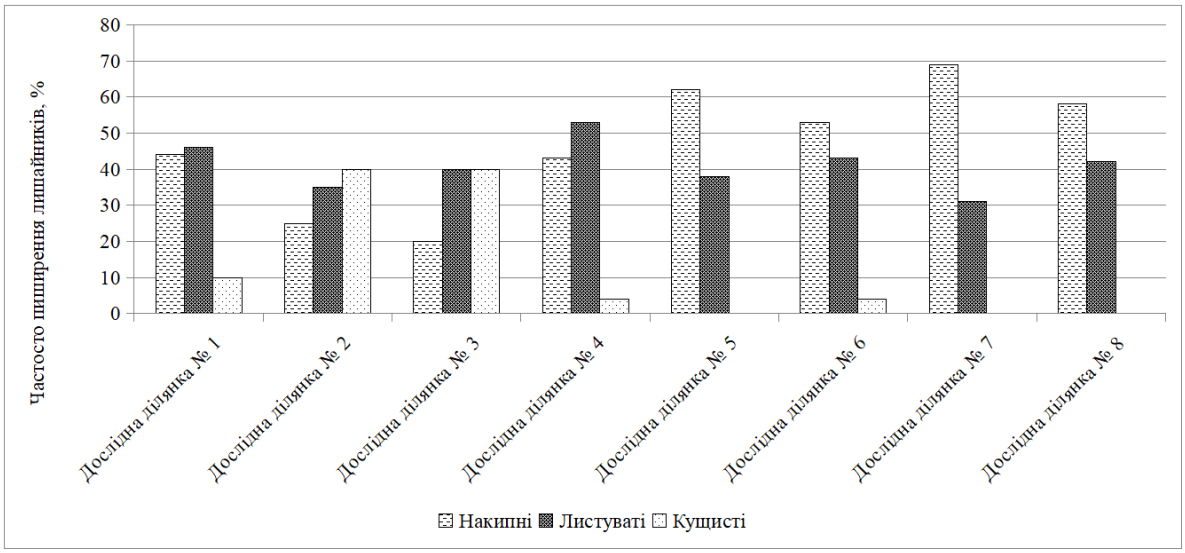
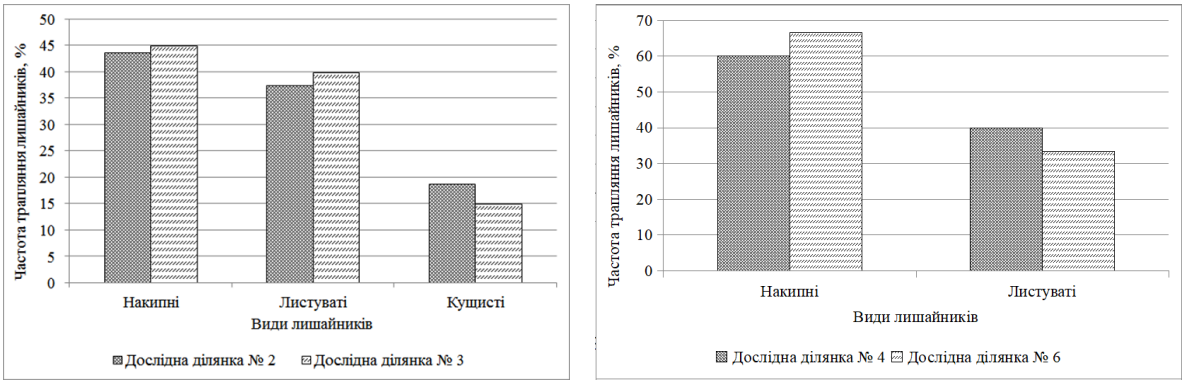


Рис. 4. Частота поширення лишайників на дослідних ділянках м. Житомир

Джерело: створено авторами на основі власних досліджень



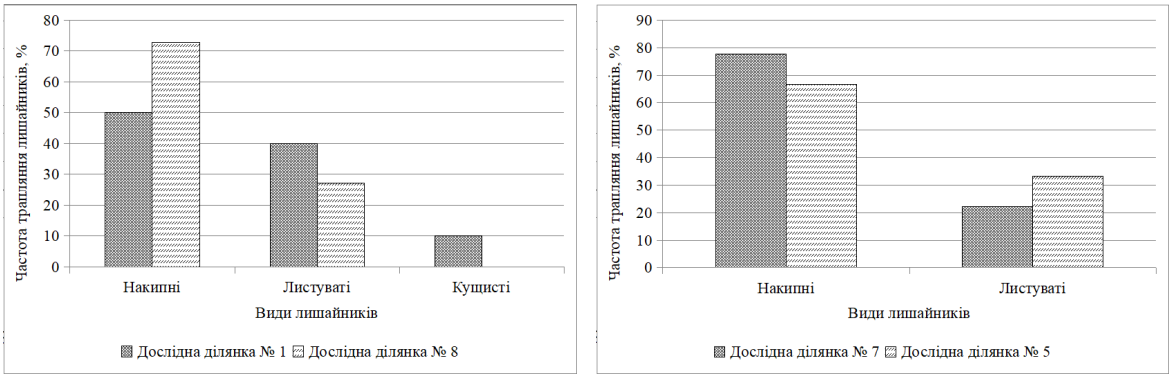
а б

Рис. 5. Поширення лишайників на дослідних ділянках (а – № 2 та № 3; б – № 4 та № 6)

Джерело: створено авторами на основі власних досліджень

частки накипних. Водночас на дослідній ділянці №1 співвідношення листуватих і накипних лишайників є приблизно однаковим. Крім того, попри значне транспортне навантаження, на обох ділянках відмічено поодинокі випадки наявності кущистих лишайників.

Найвищу інтенсивність автотранспортного руху зафіксовано на дослідних ділянках №5 та №7 (рис. 6б). На цих територіях частка проективного покриття, сформована накипними лишайниками, перевищує 60 %. Для ділянки №5 кількість листуватих форм є у 2,0 раза меншою порівняно з накипними, водночас вона у 1,5 раза перевищує відповідний показник листуватих лишайників на ділянці №7. Порівняльний аналіз інтенсивності поширення накипних та листуватих лишайників на всіх дослідних ділянках дав змогу виокремити три групи (рис. 7). До першої групи з максимальним рівнем поширення належать ділянки №7 та №8; другу групу з помірними показниками становлять ділянки №6, №5 і №4; до третьої групи з найменшим поширенням накипних лишайників віднесено ділянки №1, №2 та №3. Аналізуючи поширення листуватих лишайників на дослідних ділянках в місті Житомир, можна відмітити, що там, де інтенсивний рух автотранспорту їх наявність є меншою порівняно з ділянками, де рух є помірним або обмеженим. Отже, внаслідок створення негативних умов навколишнього середовища створилися погані умови для росту листуватих лишайників.



а б

Рис. 6. Поширення лишайників на дослідних ділянках (а – № 8 та № 1; б – № 7 та № 5)

Джерело: створено авторами на основі власних досліджень

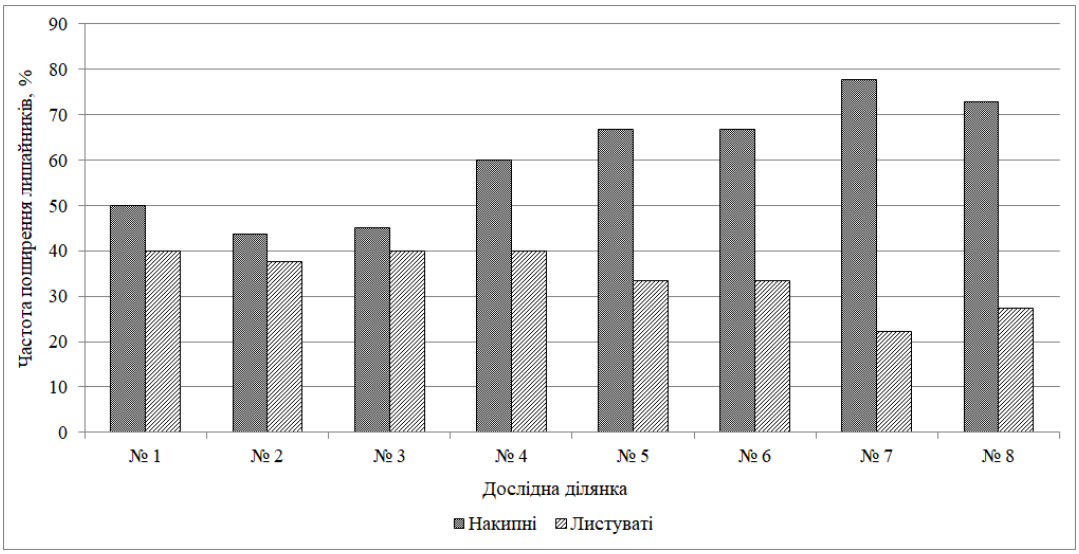


Рис. 7. Поширення накипних та листуватих лишайників на дослідних ділянках, %

Джерело: створено авторами на основі власних досліджень

Отже, результати досліджень свідчать, що на всіх дослідних ділянках домінують накипні лишайники, частка листуватих форм є суттєво меншою, а кущисті лишайники виявлені лише на двох ділянках. Це дає підстави стверджувати, що якість атмосферного повітря на досліджуваних територіях значною мірою визначається інтенсивністю руху автотранспорту, яка, у свою чергу, впливає на поширення, ріст і розвиток лишайників. Отримані дані також підтверджують наявність змін у видовому різноманітті ліхенобіоти вздовж градієнта автотранспортного навантаження. Найменшу кількість видів та найнижчі показники проективного покриття стовбурів дерев зафіксовано на дослідних ділянках №5, №7 і №8, де інтенсивність руху автотранспортних засобів є найвищою.

На підставі розрахунків індексу чистоти повітря (ІЧП.) для м. Житомир було виокремлено чотири ізотоксичні ліхеноіндикаційні зони, які значною мірою узгоджуються з результатами картування груп епіфітних лишайників із подібною чутливістю до атмосферних забруднень (рис. 8). До сильно забрудненої ліхеноіндикаційної зони (ІЧП = 1,0–4,9) належать дослідні ділянки №5, №7 та №8. Найгірші показники якості повітря зафіксовано на ділянці №5, де індекс чистоти повітря Ле Блана та Де Слоовера становить 1,0. Для ділянки №8 цей показник дорівнює 1,8, а для ділянки №7 – 2,8. Епіфітний лишайниковий покрив у межах цієї зони характеризується низьким видовим різноманіттям і незначним або фрагментарним проективним покриттям. Середньо забруднена

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

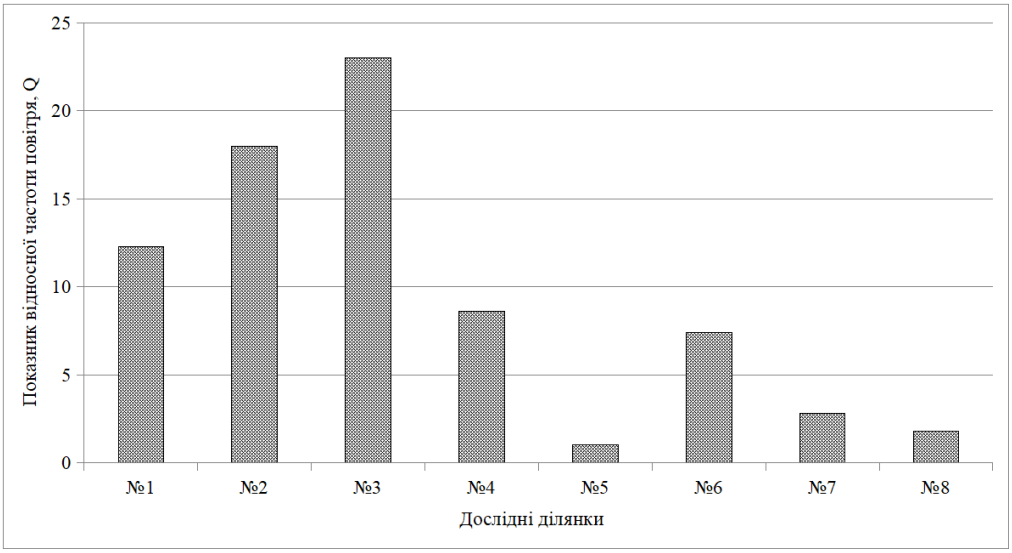


Рис. 8. Показник відносної чистоти атмосфери м. Житомир

Джерело: створено авторами на основі власних досліджень

ліхеноіндикаційна зона (ІЧП = 5,0–9,5) представлена окремими локальними осередками в межах міста, зокрема на вулицях Покровська та Івана Гонти. Для дослідної ділянки №6 індекс чистоти повітря становить 7,4, а для ділянки №4 – 8,6. Видовий склад лишайників у цій зоні є більш різноманітним порівняно із сильно забрудненою територією, проте найбільш чутливі до атмосферного забруднення кущисті форми тут не виявлені.

Слабко забруднена ліхеноіндикаційна зона (ІЧП = 10,0–14,9) відповідає дослідній ділянці №1, де видовий склад лишайників значно різноманітніший у порівнянні з іншими зонами, а індекс чистоти повітря становить 12,3. Не забруднена зона (ІЧП ≥ 15) спостерігається на ділянках №2 та №3, з показниками чистоти повітря 18 та 23 відповідно. Для цих зон характерне найбільше видове різноманіття епіфітних лишайників та наявність найчутливіших до забруднення атмосферного повітря кущистих форм.

Таким чином, на території м. Житомир простежується чіткий зв'язок між ізотоксичними ліхеноіндикаційними зонами та ареалами високих концентрацій певних полютантів, пов'язаних із промисловими та транспортними джерелами викидів. Викиди шкідливих речовин від автотранспорту розповсюджуються здебільшого рівномірно по всій території міста, тому сильно і середньо забруднені зони збігаються з ділянками інтенсивного руху автотранспорту. Зона слабкого забруднення розташована на виїзді з міста, де транспортне навантаження помірне. Не забруднена зона переважно характерна для значно заліснених територій із великими парковими масивами та добре провітрюваних частин міста, де відсутні інтенсивні транспортні потоки.

Висновки. На території м. Житомир найчастіше зустрічалися накипні та листуваті лишайники: *Physcia adscendens* (Фісція висхідна), *Graphis* (Графіс), *Lecanora allophana* (Леканора), *Xanthoria parietina* (Ксанторія настінна), *Parmelia sulcata* (Пармелія борозенчаста), *Hypogymnia physodes* (Гіпогімнія вздута) та *Flavoparmelia caperata* (Флавопармелія козина). Поодиноко спостерігалися кущисті лишайники: *Cladonia* (Кладонія) та *Usnea* (Уснея). На всіх дослідних ділянках домінують накипні та листуваті лишайники, а кущисті зустрічаються найрідше. На ділянках №5, №6, №7 та №8 частка накипних форм значно перевищує листуваті, що свідчить про високий рівень забруднення повітря. На ділянках №2 та №3 співвідношення накипних, листуватих і кущистих лишайників більш збалансоване. Видове різноманіття ліхенобіоти змінюється відповідно до градієнта автотранспортного навантаження. Найменші значення ліхенофлори та проективного покриття стовбурів дерев спостерігаються на ділянках №5, №7 та №8, де рух автотранспорту є найбільш інтенсивним. За розрахунками І.Ч.П. у м. Житомир виділено чотири ізотоксичні ліхеноіндикаційні зони:

- Сильно забруднена зона (ІЧП = 1,0–4,9) – ділянки №5, №7 та №8;
- Середньо забруднена зона (ІЧП = 5,0–9,9) – ізольовані осередки на вулицях Покровська (№4) та Івана Гонти (№6);
- Слабко забруднена зона (ІЧП = 10,0–14,9) – ділянка №1;
- Не забруднена зона (ІЧП ≥ 15) – ділянки №2 та №3.

Література

1. Ашихміна Т. Я. та ін. Біоіндикація та біотестування – методи пізнання екологічного стану навколишнього середовища. Київ: Знання, 2005. 450 с.
2. Кирієнко О.А., Імранова Е.Л. Мікробіологічна оцінка екологічного стану урбанізованих *ґрунтів. Екологія урбанізованих територій*. 2008. № 4. С. 57–61.
3. Міхєєв О.М., Гуща М. І., Шиліна Ю.В., Овсяннікова Л.Г. Застосування рослинних тест-систем для оцінки комбінованої дії стресорів різної природи на екосистеми. *Наукові праці. Екологія*. 2006. Т. 53, № 40. С. 56–64.
4. Кондратюк С. Я. Індикація стану навколишнього середовища України за допомогою лишайників. Київ, 2008. 336 с.
5. Davies L., Bates J. W., Bell J. N. B., James P. W., Purvis O. W. Diversity and sensitivity of epiphytes to oxides of nitrogen in London. *Environmental Pollution*. 2007. Vol. 146, No. 2. P. 299–310. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.03.023
6. Westberg M., Moberg R., Myrdal M., Nordin A., Ekman S. Santesson's checklist of fennoscandian lichen-forming and lichenicolous fungi. 2021. 856 p.
7. Франчук Г. М., Антонов А. М., Маджд С. М., Загоруй Я. В. Екологічна оцінка впливу авіаційних транспортних процесів на якість компонентів довкілля. *Advances in Aerospace Technology*. 2006. Т. 27, № 1. С. 184–190.
8. Процак Ю. О. Переваги та недоліки оцінки хімічного забруднення атмосфери в зоні впливу аеропортів. *Екологічна безпека держави*. 2019. С. 25.
9. Корбут М. Б., Мальований М. С., Мельник З. Є. Визначення рівня забруднення атмосферного повітря в зоні впливу звалища твердих побутових відходів м. Житомира за допомогою ліхеноіндикації. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2013. № 6. С. 130–134.
10. Процак Ю. О. Переваги застосування методів біоіндикації стану атмосферного повітря поблизу аеропортів. Інноваційні технології: матеріали наук.-техн. конф. Київ, 2019. С. 79.
11. Кондратюк С. Я., Мартиненко В. Г. Ліхеноіндикація. Київ–Кіровоград: ТОВ «КОД», 2006. 260 с.
12. Van Herk C. M. Epiphytes on wayside trees as an indicator of eutrophication in the Netherlands. Monitoring with lichens – monitoring lichens. *Dordrecht: Springer*, 2002. P. 285–289. 10.1007/978-94-010-0423-7_21
13. Radomska M. M., Strava T. V., Kolotylo O. A. The assessment of atmospheric air condition within Sviatoshynskyi district of Kyiv city applying lichenoindication method. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2016. Vol. 26, No. 1. P. 190–195. https://doi.org/10.15421/40260128
14. Вельчева Л. Г., Антоновська Л. В. Вивчення стану атмосферного повітря методом ліхеноіндикації. *Екологія та ноосферологія*. 2008. Т. 19, № 1–2. С. 182–185.
15. Литвиненко Ю. І., Вакал А. П., Литвиненко Д. В., Маслов Д. О. Ліхеноіндикаційна оцінка стану природних екосистем у зоні повітряного забруднення ПАТ«Сумихімпром». *Наукові записки СумДПУ імені А.С. Макаренка. Географічні науки*. 2024. Т. 2, № 5. С. 9–15. https://doi.org/10.5281/zenodo.11124701
16. Gerasymenko O., Bohachova O., Mokriakova M. Lichen indicative assessment of the ecological state of atmospheric air in urbanised areas of Eastern Ukraine. *Environmental Problems*. 2025. Т. 10, № 1. С. 55–61. https://doi.org/10.23939/ep2025.01.055
17. Ричак Н. Л., Свистунова А. М. Оцінка якості атмосферного повітря урбосистеми методом ліхеноіндикації (на прикладі Дзержинського району міста Харкова). *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія: Екологія*. 2013. № 1070, вип. 9. С. 74-83. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKhNU_2013_1070_9_13
18. Литвиненко Ю. І., Вакал А. П., Литвиненко Д. В. Біоіндикаційні дослідження за епіфітною ліхенофлорою м. Суми та його околиць. *Слобожанський науковий вісник. Серія природнича*. 2022. Т. 1, вип. 2. С. 26–30. https://doi.org/10.32782/naturalspu/2023.2.
19. Кліменко В. М. Ліхеноіндикаційна оцінка змін якості атмосферного повітря м. Херсона за 20 років. *Чорноморський ботанічний журнал*. 2015. Т. 1, № 4. С. 521–534. https://doi.org/10.14255/2308-9628/15.114/8
20. Клименко В. М. Ліхеноіндикаційна оцінка якості повітря невеликих і середніх міст півдня України. *Чорноморський ботанічний журнал*. 2016. Т. 12, № 2. С. 191–205. https://doi.org/10.14255/2308-9628/16.122/8
21. Шершова Н. В. Ліхеноіндикація стану атмосферного повітря в місті Васильків Київської області. *Український ботанічний журнал*. 2018. Т. 75, №2. С. 143–148. https://doi.org/10.15407/ukrbotj75.02.143
22. Окснер А.М. Флора лишайників України. Т. 2, вип. 3. К.: Наук. думка, 2010. 662 с.
23. Кондратюк С.Я. Індикація стану навколишнього середовища України за допомогою лишайників. Київ. 2008. 336 с.
24. Conti, M. E., Cecchetti, G. Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution assessment a review. *Environmental Pollution*. 2001. Vol. 114. Is. 3. P. 471–492. https://doi.org/10.1016/S0269-7491(00)00224-4
25. Екологічний паспорт Житомирської області. 2024. URL: https://eprdep.zht.gov.ua/ecopasport%202024.pdf (дата звернення: 10.04.2026 р.).

Дата першого надходження статті до видання: 30.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

ЕКОЛОГІЯ ЛІСОВИХ РЕСУРСІВ

УДК 630*26:625.7:504.5
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.9

ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ЗАХИСНИХ ЛІСОСМУГ УЗДОВЖ АВТОМОБІЛЬНОЇ ТРАСИ Н08 (С. БРАТСЬКЕ)

Гунько С.О.[1], **Сапа Є.Ю.**[2]
[1]Дніпровський державний аграрно-економічний університет
вул. Сергія Єфремова, 25, 49000, м. Дніпро
[2]ДП «Ліси України» філія «Східний лісовий офіс»
вул. Космічна, буд. 35,м. Дніпро, 49000
gooonko@gmail.com, sapaevheniya@gmail.com

У статті наведено результати екологічної оцінки захисних примагістральних лісосмуг уздовж автомобільної траси Н08 у межах с. Братське. Проведено інвентаризацію зелених насаджень, аналіз видового складу та оцінку життєвого і фітосанітарного стану деревостанів на двох пробних площах. Встановлено, що дендрофлора досліджуваної ділянки представлена 15 видами деревно-чагарникових рослин, які належать до 13 родів та 12 родин, загальною чисельністю 611 екземплярів.

Виявлено, що у складі насаджень переважають види з ажурною кроною, зокрема Fraxinus pennsylvanica, Populus boleana, Catalpa bignonioides, тоді як частина видів представлена поодинокими екземплярами. На другій пробній площі домінують Aesculus hippocastanum та Fraxinus pennsylvanica, інші види трапляються значно рідше. Загалом у насадженнях спостерігається нерівномірний розподіл видів та обмежене різноманіття.

Оцінка життєвого стану показала, що переважна більшість рослин перебуває у незадовільному стані: лише 3,1 % дерев віднесено до категорії «здорові», тоді як 60,9 % становлять сильнопошкоджені. Частка відмираючих рослин становить близько 5 %, а сухостійних – 2,6 %. Розрахований індекс пошкодження деревостану (47,7) відповідає категорії «сильно пошкоджений деревостан».

Встановлено домінування окремих видів, зокрема Aesculus hippocastanum та Fraxinus pennsylvanica, які формують основу насаджень, що знижує їх екологічну стійкість. Отримані результати свідчать про необхідність проведення заходів з оптимізації примагістральних лісосмуг, зокрема реконструкції насаджень, збагачення видового складу та підвищення рівня догляду. Запропоновані заходи спрямовані на підвищення екологічної ефективності та стійкості захисних насаджень в умовах антропогенного навантаження. *Ключові слова:* захисні лісосмуги; примагістральні насадження; життєвий стан; видовий склад; фітосанітарний стан; індекс пошкодження; оптимізація насаджень.

Ecological Assessment and Optimization of Roadside Shelterbelts Along the N08 Highway (Bratske Village). Hunko S., Sapa E.

The article presents the results of an ecological assessment of protective roadside shelterbelts along the N08 highway within the area of Bratske village. An inventory of green plantations was carried out, including the analysis of species composition, as well as the assessment of the vitality and phytosanitary condition of tree stands on two sample plots. It was established that the dendroflora of the studied area comprises 15 species of woody and shrubby plants belonging to 13 genera and 12 families, with a total of 611 individuals.

The study revealed the predominance of species with openwork crowns, in particular Fraxinus pennsylvanica, Populus boleana, and Catalpa bignonioides, while some species were represented by single individuals. On the second sample plot, Aesculus hippocastanum and Fraxinus pennsylvanica dominated, whereas other species occurred less frequently. In general, the plantations are characterized by uneven species distribution and limited diversity.

The assessment of the vitality of the plantations showed that the majority of trees are in unsatisfactory condition: only 3.1% were classified as healthy, while 60.9% were severely damaged. The proportion of dying plants is about 5%, and dead standing trees account for 2.6%. The calculated tree stand damage index (47.7) corresponds to the category of “severely damaged stand”.

The dominance of certain species, particularly Aesculus hippocastanum and Fraxinus pennsylvanica, reduces the ecological stability of the plantations. The obtained results indicate the need for optimization measures, including reconstruction of shelterbelts, enrichment of species composition, and improvement of maintenance practices. The proposed measures are aimed at enhancing the ecological efficiency and resilience of protective plantations under conditions of increasing anthropogenic pressure. *Key words:* protective shelterbelts; roadside plantations; vitality; species composition; phytosanitary condition; damage index; plantation optimization.

Постановка проблеми. Незважаючи на важливу екологічну роль захисних примагістральних лісосмуг, їх сучасний стан у більшості випадків характеризується зниженням життєздатності, порушенням структури та зменшенням ефективності виконання основних функцій. В умовах зростання транспортного навантаження, посилення антропогенного впливу та кліматичних змін

© Гунько С.О., Сапа Є.Ю., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

відбувається деградація деревостанів, що проявляється у всиханні, зрідженні насаджень, зміні породного складу та погіршенні їх санітарного стану.

Особливої актуальності набуває проблема відсутності системного підходу до оцінки стану примагістральних лісосмуг і розроблення науково обґрунтованих заходів щодо їх оптимізації. Недостатня увага до моніторингу, реконструкції та догляду за насадженнями призводить до зниження їх екологічної ефективності та втрати захисних властивостей.

У зв'язку з цим виникає необхідність комплексної екологічної оцінки стану захисних лісосмуг уздовж автомобільних магістралей, зокрема траси Н08 у межах с. Братське, з метою виявлення основних проблем їх функціонування та обґрунтування заходів щодо оптимізації, підвищення стійкості та ефективності їх функціонування.

Актуальність дослідження. Захисні примагістральні лісосмуги є важливим елементом екологічного балансу та стійкості довкілля, особливо в умовах інтенсивного транспортного навантаження. Лісосмуги виконують ключові екологічні функції: захист від пилу, шуму, вітрової ерозії, регулювання водного балансу та поліпшення мікроклімату прилеглих територій. Однак сучасні виклики, такі як зміна клімату, збільшення транспортного потоку та антропогенний вплив, негативно впливають на стан цих насаджень.

Екологічна оцінка життєвого стану примагістральних лісосмуг є важливим завданням для визначення поточного стану насаджень, розробки рекомендацій щодо їх удосконалення, а також підвищення їх екологічної функціональності. Це дозволить виявити причини зниження ефективності зелених насаджень, науково обґрунтувати заходи з оновлення та підвищення стійкості лісосмуг для забезпечення їхньої довготривалої ефективності. Оптимізація складу деревостанів, їхня реконструкція та догляд сприятимуть створенню більш ефективних захисних насаджень [1, 4, 22, 30].

Оцінка життєвого стану захисних примагістральних лісосмуг актуальна в плані розв'язання низки проблем, серед яких: старіння деревостанів, недостатнє господарське обслуговування, антропогенний вплив і зміна клімату, тому володіння сучасною інформаційною базою про стан та динаміку захисних примагістральних лісосмуг можливе лише за умов проведення їх комплексного вивчення [7, 10, 20].

Удосконалення примагістральних лісосмуг відповідає загальним принципам сталого розвитку, оскільки сприяє зменшенню антропогенного навантаження на природне середовище, збереженню біорізноманіття та покращенню якості життя населення. Це також є важливим у контексті адаптації до змін клімату, адже правильно підібрані й доглянуті насадження можуть значно покращити стійкість екосистем [5, 12, 13, 15, 21].

Мета роботи: оцінити життєвий стан захисних примагістральних лісосмуг траси Н08 в межах села Братське та запропонувати перспективи їх удосконалення.

Об'єкт дослідження: штучні захисні примагістральні насадження вздовж траси Н-08.

Предмет дослідження: видовий склад, життєвий стан, екологічна та декоративна функціональність лісосмуг, заходи їх удосконалення.

Аналіз останніх наукових досліджень і публікацій. Примагістральні насадження (лісосмуги) є важливою складовою екологічного захисту територій, прилеглих до транспортних магістралей. Їх створення обумовлено необхідністю зниження негативного впливу транспортної інфраструктури на навколишнє середовище, покращення кліматичних і ґрунтових умов та зменшення ерозії земель [19].

У степових регіонах лісосмуги є найважливішим засобом боротьби з вітровою ерозією ґрунтів, пиловими бурями та посухами. Захисні насадження вздовж магістралей у степовій зоні також сприяють затриманню снігу взимку, що забезпечує зволоження ґрунтів навесні.

У лісостеповій зоні лісосмуги забезпечують баланс між лісовими і відкритими територіями, запобігають деградації земель та регулюють водний баланс. Примагістральні насадження слугують бар'єром для шуму, пилу та токсичних речовин, що виділяються транспортом.

У лісових регіонах лісосмуги створюються з метою запобігання деградації існуючих лісів унаслідок транспортної діяльності. Вони виконують функцію біологічного захисту та створюють умови для збереження біорізноманіття [24, 27, 29].

У гірських регіонах примагістральні насадження є бар'єром для сходу снігових лавин та селевих потоків. Вони також стабілізують ґрунти на схилах, захищаючи дорожні магістралі від ерозії.

Активне створення лісосмуг в Україні почалося у середині XX століття [3, 16, 18, 23]. У рамках проєкту з освоєння степів і боротьби з посухами були закладені величезні захисні насадження, у тому числі вздовж транспортних магістралей. Особлива увага приділялася багаторядним лісосмугам, які складалися з різних порід дерев, пристосованих до місцевих умов. Так були створені захисні лісосмуги вздовж автодоріг та залізниць у степових областях України (Херсонська, Запорізька області), насадження в рамках реалізації програми озеленення та боротьби з вітровою ерозією [2, 9].

На початку XXI століття увага до стану примагістральних насаджень знизилася, і багато з них зазнали деградації через недбале господарювання,

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

вирубування та відсутність належного догляду. Однак останнім часом почали впроваджувати нові підходи до відновлення захисних лісосмуг, використовуючи сучасні ландшафтно-екологічні принципи [11, 17, 25, 26]. Можна відмітити відновлення насаджень уздовж міжнародних трас (наприклад, М05 Київ-Одеса) із використанням декоративних видів дерев, а також реалізація проєктів з відновлення лісосмуг за підтримки міжнародних екологічних організацій [6, 8, 14, 20].

Розглядаючи досвід створення примагістральних насаджень за кордоном відмітимо, що у європейських країнах примагістральні лісосмуги мають не лише екологічну, а й естетичну функцію [31, 32]. У Німеччині знайшли активне застосовування лісосмуги з різноманітними породами дерев та чагарників для зменшення шуму, очищення повітря і покращення мікроклімату. Важливим аспектом є створення «зелених коридорів» для дикої фауни. У Франції уздовж автомагістралей часто висаджують декоративні дерева, такі як платани або каштани, які водночас виконують функцію захисту від забруднення викидами автотранспорту. У США лісосмуги створюються в основному для боротьби з вітровою ерозією, особливо в центральних рівнинних штатах. У міських регіонах використовуються «зелені смуги» для захисту житлових зон від негативного впливу автомагістралей [31, 32].

У Китаї примагістральні лісосмуги виконують важливу роль у зниженні рівня забруднення. Уздовж нових автомагістралей створюються багаторядні насадження, які включають місцеві й інтродуковані породи дерев із високою стійкістю до забруднень.

У країнах Південної Азії таких країнах, як Індія та Пакистан, примагістральні насадження створюються з швидкорослих порід (наприклад, евкаліпт, акація), які здатні швидко забезпечити захист територій від пилу та спеки [33, 34].

Примагістральні насадження мають багатовікову історію розвитку та виконують важливі екологічні, економічні та соціальні функції. Досвід їх створення в Україні та за кордоном свідчить про необхідність адаптації підходів до сучасних умов. Для ефективного функціонування лісосмуг потрібні регулярний моніторинг, підтримка їх екологічної стійкості та впровадження інноваційних рішень для вдосконалення їх функцій [28].

Об'єкти і методи досліджень. Об'єктами досліджень були штучні захисні примагістральні насадження вздовж траси Н-08 Дніпро – Запоріжжя біля с. Братське, загальною протяжністю близько 8 км (дві пробні площі двобічної смуги шосе довжиною по 4 км – рис. 1). Досліджена ділянка є частиною автошляху Н-08 – траси національного значення на території України, шлях якої проходить таким маршрутом: Бориспіль–Кременчук–Дніпро–Запоріжжя–Пологи–Маріуполь.

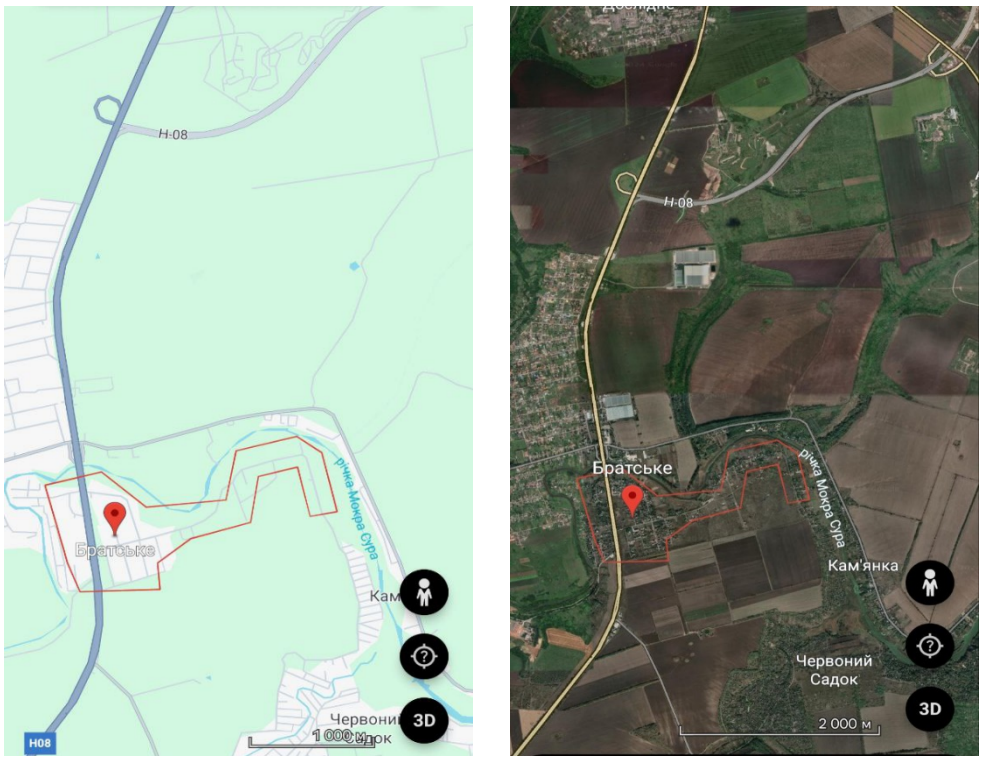


Рис. 1 Загальний вигляд об'єкту дослідження
(а – абстрактна вихідна карта без ландшафту; б – супутниковий знімок) Джерело: Google Earth

Дослідження виконували маршрутним методом з елементами фотофіксації. Під час проведення роботи були використані загальноприйняті методики інвентаризації зелених насаджень та лісової таксації. Визначали видовий склад захисних лісосмуг, структуру (кількість рядів), конструкцію (ажурна, щільна, продувна), середній діаметр та висоту насаджень.

Результати експерименту та їх аналіз. Аналіз видового складу лісосмуг показав, що дендрофлора на цьому відрізку траси представлена 15 видами деревно-чагарникових порід, які належать до 13 родів та 12 родин Всього виявлено 611 екземплярів рослин, з них суттєво переважають гіркокаштан звичайний та ясен пенсільванський, кожний з яких представлений в середньому у кількості 40 % (рис. 2). Інші породи виявлені в незначній кількості, але склад лісосмуг на 2-х пробних площах суттєво відрізняється. На обох ділянках виявлені такі види: тополя чорна, верба біла, горіх грецький, але їх кількість у складі насаджень незначна. Ясен пенсільванський є основою обох насаджень і зустрічається на обох ПП в значній кількості.

Пробна площа 1 розташована безпосередньо біля с. Братське і простягається від повороту на с. Волоське до окружної дороги в напрямку міста Дніпро. Захисні насадження перериваються технічними розривами, де розташовані автозаправні станції, села, примикання другорядних доріг, а також численними розривами в самих лісосмугах, спричиненими випадінням дерев і вирубками. Захисна смуга складається з 1-2-х рядів, має ажурну конструкцію. Відстань в ряду між рослинами (крок посадки) коливається в широких межах, часто перевищує 10 м, що значно знижує захисні властивості насадження.

Видовий склад представлений переважно породами з ажурною кроною: ясенем пенсільванським (*Fraxinus pennsylvānica Marshall*), тополею Боллє (*Populus boleana* Louche), катальпою бігнонієвидною (*Catalpa bignonioides*Walt), які в сумі складають три чверті від всіх деревних порід смуги. Всього виявлено 149 екземплярів, що представляють 9 видів деревних рослин, але чотири з них представлені одинично: тополя чорна (*Populus nigra* L.), верба біла (*Salix alba* L.), горіх волоський (*Juglans regia* L.), маслинка сріблясta (*Elaeagnus commutata* Bernh.). Дві породи мають приблизну кількість одиниць у складі насадження: робінія псевдоакація (*Robinia pseudoacacia*), абрикос звичайний (*Armeniaca vulgaris*).

Формула складу насадження:

5Яс2Тб1Кат1Рпс1Аб одТч одВб одГвол одМср

Пробна площа 2 – це лісосмуга загальною протяжністю 4 км навпроти с. Братське. Вона про-

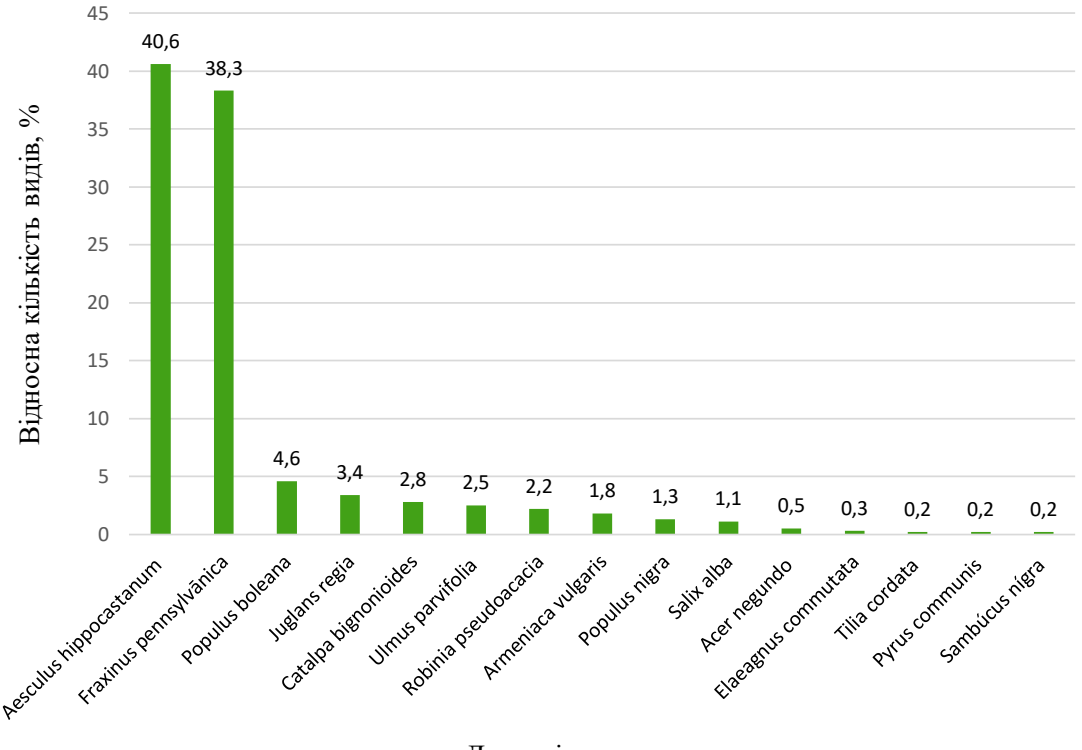


Рис. 2 Участь деревних порід у складі захисних лісосмуг, %

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

стягається від с. Новоолександрівка до окружної дороги (по напрямку до м. Дніпро).

Примагістральна захисна смуга має 2-х рядну структуру і щільну конструкцію . Переважають такі породи як: гіркокаштан звичайний (*Aesculus hippocastanum),* ясен пенсільванський *(Fraxinus pennsylvanica)*. В значно меншій кількості зустрічається в'яз дрібнолистий *(Ulmus parvifolia)*, горіх волоський (*Juglans regia)*. Інші види представлені одинично. Всього на цій пробній площі нараховано 462 деревні рослини, представлені деревостанами 9 видів (виявлено 1 екземпляр кущової рослини – бузини чорної).

Формула складу насадження:

6Гір4Яс + Вяз + Гвол одТч одКляс одВб

Аналізуючи видовий склад примагістральної захисної лісосмуги траси Н08, навпроти с. Братське обох дослідних ділянок (ПП 1 та ПП 2) відмітимо певні аналогічні моменти та відмінності. Протяжність ПП 1 дещо більша, ніж ПП 2, але кількість виявлених видів значно менша (149 екземплярів на ПП 1 проти 462 на ПП 2), хоча кожна дослідна ділянка налічувала однакову кількість видів деревних рослин (9). Крім того, на обох пробних ділянках найчастіше зустрічався ясен пенсільванський (*Fraxinus pennsylvānica* Marshall): на ПП 1 його частка серед інших видів найбільша, на ПП 2 він знаходиться на другому місці після гіркокаштану звичайного (*Aesculus hippocastanum* L).

Оцінка життєвого та фітосанітарного стану придорожніх насаджень проводилася з метою моніторингу зниження життєздатності примагістральної захисної лісосмуги, визначення стану старих або виснажених насаджень, які потребують оновлення чи реконструкції.

Встановлено, що життєвий стан рослин в захисних лісосмугах переважно незадовільний. Тільки 3,1 % дерев віднесли до категорії «здорові», вони не мають пошкоджень. Це такі породи, як горіх волоський та незначна кількість ясену ланцетного, по одному екземпляру абрикосу домашнього та в'язу дрібнолистого.

Відносно невелику кількість пошкоджень (28, 6 %) мають дерева і кущі досліджуваної території примагістральної захисної лісосмуги траси Н08. В цій категорії багато представників ясену ланцетного, гіркокаштану звичайного, тополь, в'язу дрібнолистого, робінії та маслинки. Найбільша категорія життєвого стану – «сильнопошкоджені» рослини, таких у насадженнях 60,9 %. В цій категорії переважаюча більшість таких видів: ясен ланцетний, гіркокаштан звичайний, тополя Боллє, катальпа бігнонієвидна, в'яз дрібнолистий, робінія псевдоакація, верба біла, клен ясенелистий.

Візуалізацію життєвого стану дендрофлори придорожніх насаджень траси Н08 біля с. Братське представлено на рис. 3.

Відмираючих рослин в насадженнях трохи менше 5 %. Це такі породи: гіркокаштан звичайний, катальпа бігнонієвидна, тополя Боллє, верба біла. Сухостійні дерева (16 екземплярів) складають 2,6 % рослин, з них: 6 гіркокаштанів, 2 катальпи, 5 ясенів ланцетних, 2 робінії, 1 верба біла. Отже, з нашими дослідженнями підтверджено, що найгірший стан характеризуються, в першу чергу, вологолюбні дерева, але і інші мають багато пошкоджень.

Індекс пошкодження деревостану:

$$L= (100\ n_1+70n_2+40n_3+5n_4) /$$
$$N=(1900+12250+14880+145)/611=\mathbf{47,7}$$

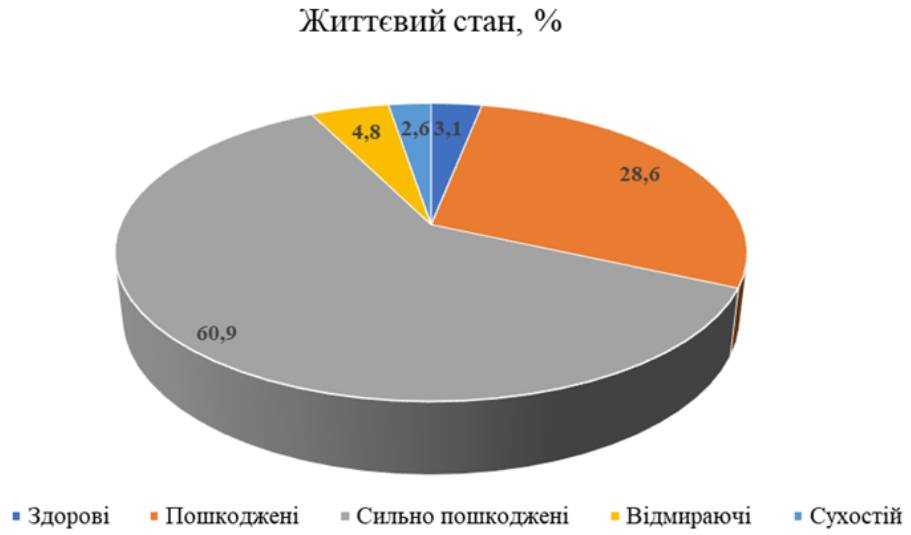


Рис. 3 Життєвий стан деревних рослин в лісосмугах, %

Такий індекс вказує на категорію «сильно пошкоджений деревостан».

Фітопатогенний стан більшості дерев, які ростуть в захисних насадженнях вздовж траси, незадовільний. Серед пошкоджень деревно-чагарникової рослинності переважають: розрідження крони, вихання скелетних гілок та однорічних пагонів (зустрічається у представників всіх видів); механічні пошкодження; рак, морозобійні тріщини, дупла (табл. 3.4). Деякі екземпляри повністю усохлі або зазнали пошкоджень шкідниками.

У таких видів як *Fraxinus lanceolata*, *Robinia pseudoacacia, Acer negundo, Aesculus hippocastanum, Armeniaca vulgaris, Catalpa bignonioides* і *Juglans regia* зустрічаються майже всі види пошкоджень. Всі представники *Aesculus hippocastanum* станом на другу половину літа вражені мінуючою міллю (*Cameraria ohridella*). Менше пошкоджені такі види як: *Populus nigra, P. boleana, Pyrus communis.* Такі пошкодження, як крайовий некроз листків, нахил стовбура, рак трапляються рідше, ніж інші і не у всіх породах.

Головні висновки:

1. Аналіз видового складу захисних примагістральних лісосмуг показав, що дендрофлора на цьому відрізку траси представлена 15 видами деревно-чагарникових порід, які належать до 13 родів та 12 родин, всього ж виявлено 611 екземплярів рослин.

2. Проведені дослідження з інвентаризації зелених насаджень та лісової таксації ПП 1 дали змогу провести аналіз її видового складу. Видовий склад представлений переважно породами з ажурною кроною: *Fraxinus pennsylvānica Marshall*, *Populus boleana* Louche, *Catalpa bignonioides*Walt., які в сумі складають три чверті від всіх деревних порід смуги. Всього виявлено 149 екземплярів, що представляють 9 видів деревних рослин, але чотири з них представлені одинично: *Populus nigra* L., *Salix alba* L., *Juglans regia* L., *Elaeagnus commutata* Bernh.

3. Аналіз видового складу ПП 2 дав такі результати: найчастіше серед інших видів зустрічаються *Aesculus hippocastanum, Fraxinus pennsylvanica*. В значно меншій кількості – *Ulmus parvifolia*, *Juglans regia*. Інші види представлені одинично. Всього на цій пробній площі нараховано 462 деревні рослини, представлені деревостанами 9 видів (виявлено 1 екземпляр кущової рослини – *Sambúcus nígra* L.).

4. Встановлено, що життєвий стан рослин в захисних лісосмугах переважно незадовільний. Тільки 3,1 % дерев віднесли до категорії «здорові», це такі породи, як горіх волоський та незначна кількість ясену ланцетного. Відносно невелику кількість пошкоджень (28, 6 %) мають дерева і кущі ясену ланцетного, гіркокаштану звичайного, тополь, в'язу дрібнолистого, робінії та маслинки, бузини чорної. Найбільша категорія життєвого стану – «сильнопошкоджені» рослини, таких у насадженнях 60,9 %. Відмираючих рослин в насадженнях трохи менше 5 %. Сухостійні дерева (16 екземплярів) складають 2,6 % рослин.

5. Додатково для характеристики життєздатності примагістральної захисної лісосмуги розраховано Індекс пошкодження деревостану, його показник становить 47,7 Такий індекс вказує на категорію «сильно пошкоджений деревостан».

Література

1. Вакулюк П.Г., Самоплавський В.І. Лісовідновлення та лісорозведення в Україні : монографія. Харків : Прапор, 2006. 384 с.
2. Генсірук С.А., Бондар В.С. Лісові ресурси України, їх охорона і використання. К.: Наукова думка, 1973. 526 с
3. Генсірук С.А. Історія лісівництва в Україні. Львів: Світ, 1995. 422с.
4. Гетьман П.А. Еколого-ценотична характеристика "докучаєвських" лісосмуг Кіровоградської області. *Український ботанічний журнал*. 2023. 80 (1). С. 84–93. https://doi.org/10.15407/ukrbotj80.01.084
5. Гладун Г.Б. Значення захисних лісових насаджень для забезпечення сталого розвитку агроландшафтів. *Науковий вісник*. 2005. № 15/7. С. 113–118.
6. Гришко С. В. Значення лісосмуг для функціонування Приазовського степу. *Регіональні проблеми України: географічний аналіз та пошук шляхів вирішення*: матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції, м. Херсон, 28-30 вересня 2011 р. Херсон, 2011. С. 96–99.
7. Гришко С. В. Лісокультурні ландшафти Північно-Західного Приазов'я: *автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. геогр. наук: 11.00.11*. Харків, 2013. 21 с.
8. Коломийчук В.П. Захисні лісосмуги як елемент екомережі степової зони України. *Екологічний вісник*. 2010. №6. С. 11–12.
9. Лазуренко В.М., Чепурда Г.М. 2015. Досвід полезахисного лісорозведення в Україні. *Гілея: науковий вісник*, 100: 88–90
10. Максименко М.В., Заїченко Я.С. Агроекологічне значення тривалого існування системи лісосмуг. *Наукові праці Уманського університету садівництва.* 2009. Вип. 71. С. 229–236.
11. Малюга В.М. Місце і роль захисних лісових насаджень у розбудові національної екологічної мережі. *Матеріали наук. конф. науково-педагогічних працівників і аспірантів Національного університету біоресурсів і природокористування України.* К.: НУБіП України, 2010. С. 99–100.
12. Петрович О.З. Полезахисні лісосмуги в контексті впровадження концепції екосистемних послуг. *Екосистеми, їх оптимізація і охорона*. 2014. Вип. 11. С. 42–49.
13. Піддубна Д. Полезахисні лісові смуги та інші захисні насадження – невід'ємні складові органічного виробництва. *Підприємництво, господарство і право*. 2016. № 1. С. 85–91.

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

14. Пономарьова О.А. Стан примагістральних лісосмуг біля смт Кирилівка Запорізької області. *Питання біоіндикації та екології*. 2016. Вип. 21, № 1–2. С. 40–53.
15. Природно-ресурсна сфера України: проблеми сталого розвитку та трансформацій / під заг. ред. Б. М. Данилишина. Київ : ЗАТ «Нічлава», 2006. 704 с.
16. Присяжнюк М. В. Розвиток дослідної справи з питань лісівництва і агромеліорації в Україні на початку ХХ ст. *Лісівництво і агромеліорація*. 2010. Вип. 117. С. 3–15.
17. Приходько С.А., Чиркова О.В. Ефективність функціонування лісосмуг як екологічних коридорів екомережі. *Промислова ботаніка*. 2009. Вип. 9. С. 25– 31.
18. Рябчук В.П. До історії деревинознавчих досліджень в Україні. *Науковий вісник НЛТУ*. 2005. Вип. 15.4. С. 9–13.
19. Свириденко В.Є. Лісівництво. Київ: Арістей, 2004. 544 с
20. Сірачова О.О., Кватернюк С.М. Екологічний аналіз сучасного стану захисних лісових насаджень в Україні. *Міжн. наук.-практ. конф. «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи»*, 2023.
21. Ткач В. П. Наукові аспекти вирішення проблеми відтворення лісів і сталого ведення лісового господарства. *Лісівництво і агролісомеліорація*. 2010. Вип. 117. С. 16–20
22. Ткачук О.П., Панкова С.О. Склад і біометричні показники полезахисних лісосмуг Центрального Лісостепу. *Збалансоване природокористування*. 2021. № 4. С. 117–124. DOI: 10.33730/2310-4678.4.2021.253095
23. Фурдичко О. І. Першопостаті українського лісівництва. Нариси до лісової історії. Львів: ВАТ «Бібльос», 2000. 372с.
24. Фурдичко О.І., Стадник А.П. Наукові основи функціонування системи захисних лісів і захиснихлісових насаджень в агроландшафтах України. *Агроекологічний журнал*. Київ. 2010. № 4. С. 5–12
25. Чехній В. М. Дослідження станів ландшафтних комплексів: витоки й сучасність. *Наукові записки ВДПУ. Серія: Географія*. 2001. № 1. С. 37–45.
26. Чиркова О.В. Структура лісосмуг як складовий елемент екологічної мережі. *Проблеми екології та охорони природи техногенного регіону.* 2010. № 1 (10). С. 97–104.
27. Юхновський В.Ю. Лісоаграрні ландшафти рівнинної України: оптимізація, нормативи, екологічні аспекти. К.: Інститут аграрної економіки, 2005.273с.
28. Юхновський В.Ю. Малюга М.О., Штофель В.М., Дударець С.М. Шляхи вирішення проблеми полезахисного лісорозведення в Україні. *Наукові праці Лісівничої академії наук України*. Львів, 2009. Вип. 7. С. 62–65.
29. Якуба М.С. Критерії визначення функціонального стану полезахисних лісосмуг. *Питання біоіндикації та екології.* 2017. Вип. 22, № 1. С. 19–31
30. Якуба М.С., Горбань В.А. Історичні аспекти створення та особливості функціонування полезахисних насаджень степової зони України. *Питання степового лісознавства та лісової рекультивації земель*. 2021. Том 50. С. 33–43. DOI: 10.15421/442104
31. Burgess, P. J., & Rosati, A. Advances in European agroforestry: results from the AGFORWARD project. *Agroforestry systems. 2018.* 92 (4), 801-810. URL:https://doi.org/10.1007/s10457-018-0261-3 (дата звернення: 10.10. 2025).
32. Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human. Well-Being: Synthesis. Washington: Island Press, 2005. 155 p.
33. Pagiola S., von Ritter K., Bishop J. Assessing the Economic Value of Ecosystem Conservation. World Bank, 2004. URL:http://129.3.20.41/eps/othr/papers/0502/0502006.pdf (дата звернення: 10.11. 2025).
34. Vysotska, N. Y., Sydorenko, S. V., & Sydorenko, S. H. Recreational influence on the condition and structure of forest shelter belts. *Forestry and forest melioration. 2018.* 132, 84–93. URL: http://forestry-forestmelioration.org.ua/index.php/journal/article/view/12 (дата звернення: 08.11. 2025).

Дата першого надходження статті до видання: 30.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 911.9(477.43/44)
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.10

ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ВІДНОВЛЕННЯ ЛІСОВИХ РЕСУРСІВ ПОДІЛЬСЬКОГО РЕГІОНУ

Питуляк М.Р., Питуляк М.В., Гунько С.І., Питуляк М.М.
Західноукраїнський національний університет
вул. Львівська, 11 46009 Тернопіль
myroslava.pytuliak@gmail.com, mykola.pytuliak@gmail.com,
s.i.gunko@ukr.net, maryana.pytulyak@gmail.com

У статті проаналізовано сучасний стан, структуру та динаміку відтворення лісових ресурсів Подільського регіону (Тернопільської, Хмельницької та Вінницької областей).

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення рівня лісистості регіону, який наразі є нижчим за середньоукраїнський (16%) та оптимальний для Поділля (20%). Зокрема, цей показник у Хмельницькій області становить 12,9%, Вінницькій – 14,4%,Тернопільській – 14,7%. Висвітлено законодавче визначення лісових ресурсів як сукупності матеріальних благ та корисних екологічних властивостей лісу.

Встановлено, що лісовий фонд Поділля (866,3 тис. га) характеризується значною територіальною та функціональною диференціацією. Найбільша площа лісів зосереджена у Вінницькій області (43,9% від загальної площі регіону), проте тут переважає господарська спрямованість (76,6% – експлуатаційні ліси). Натомість ліси Тернопільщини та Хмельниччини мають вищий рівень екологізації з вагомою часткою природоохоронних та захисних категорій. Породний склад регіону є переважно твердолистяним (близько 80%), де домінують дуб звичайний та граб, що забезпечує кліматичну стійкість екосистем.

Особливу увагу приділено аналізу методів відтворення лісів. Доведено домінування штучного лісовідновлення в усіх областях, яке у Вінницькій області сягає 99,2%. Виявлено відмінності у підходах до лісорозведення: якщо Тернопільська область демонструє найвищий показник природного поновлення (17,1%), то Хмельницька область орієнтована на інтенсивну посадку лісових культур (89,4%). Оцінено масштаби лісорозведення на деградованих землях як стратегічний напрям боротьби з ерозією та дефіцитом вологи.

Подальший розвиток лісового господарства Поділля має базуватися на переході від монокультур до формування складних змішаних насаджень. Це дозволить не лише досягти цільових показників лісистості, а й підвищити адаптивність лісових екосистем до сучасних екологічних викликів та змін клімату. *Ключові слова:* лісові ресурси, Подільський регіон, лісистість, лісовідновлення, лісорозведення, функціональна структура лісів.

Ecological Aspects of Conservation and Restoration of Forest Resources in the Podillia Region. Pytuliak M., Pytuliak M., Hunko S., Pytuliak M.

The article analyzes the current state, structure, and dynamics of forest resource reproduction in the Podillia region (Ternopol, Khmelnitsky, and Vinnitsa regions).

The relevance of the study is driven by the need to increase the region's forest cover, which is currently lower than both the national average (16%) and the optimal level for Podillia (20%). In particular, this indicator stands at 12.9% in the Khmelnitsky region, 14.4% in the Vinnitsa region, and 14.7% in the Ternopol region. The study highlights the legislative definition of forest resources as a combination of material goods and beneficial environmental properties of the forest.

The results of the study establish that the forest fund of Podillia (866.3 thousand hectares) is characterized by significant territorial and functional differentiation. The largest forest area is concentrated in the Vinnitsa region (43.9% of the total regional area); however, an economic orientation prevails there (76.6% are operational forests). In contrast, the forests of the Ternopol and Khmelnitsky regions demonstrate a higher level of ecological orientation, with a substantial share of nature conservation and protective categories. The species composition of the region is predominantly hardwood (about 80%), dominated by common oak and hornbeam, which ensures the climate resilience of the ecosystems.

Special attention is paid to the analysis of forest reproduction methods. The dominance of artificial reforestation is proven across all regions, reaching 99.2% in the Vinnitsa region. Differences in a forestation approaches were identified: while the Ternopol region demonstrates the highest rate of natural regeneration (17.1%), the Khmelnitsky region is focused on intensive planting of forest cultures (89.4%). The scale of a forestation on degraded lands is evaluated as a strategic direction for combating erosion and moisture deficits.

The conclusions emphasize that the further development of forestry in Podillia should be based on a transition from monocultures to the formation of complex mixed stands. This will not only allow for the achievement of target forest cover indicators but also increase the adaptability of forest ecosystems to modern environmental challenges and climate change. *Key words:* forest resources, Podillia region, forest cover, reforestation, a forestation, functional structure of forests.

Постановка проблеми. Лісокористування у Подільському регіоні характеризується з низькою лісистістю та екологічною стійкістю лісових екосистем, що спричинено комплексною дією декількох факторів – кліматичних, антропогенних. Отже, необхідна розробка нової екологічно орієнтованої моделі відтворення лісів, яка б базувалася на принципах наближеного до природи лісівництва, забезпечувала

© Питуляк М.Р., Питуляк М.В., Гунько С.І., Питуляк М.М., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

збереження генетичного фонду автохтонних видів та адаптацію екосистем до нових кліматичних реалій регіону.

Актуальність дослідження. У сучасних умовах посилення глобальних кліматичних змін, деградації природних екосистем та зростання антропогенного навантаження проблема збереження і відновлення лісових ресурсів набуває особливої гостроти. Подільський регіон, що характеризується значною освоєністю територій, інтенсивним сільським господарством і фрагментованістю лісових масивів, є вразливим до екологічних порушень. Зменшення площ лісів, погіршення їхнього санітарного стану, втрата біорізноманіття та зниження екосистемних функцій зумовлюють необхідність пошуку ефективних підходів до їх охорони та відновлення. Водночас лісові екосистеми регіону мають значний потенціал для стабілізації довкілля, що підкреслює актуальність дослідження екологічних аспектів їх сталого використання.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження безпосередньо пов'язане з реалізацією державних та регіональних програм. Зокрема з Державною стратегією управління лісами України до 2035 року та обласними програмами розвитку лісового господарства в Хмельницької, Тернопільській та Вінницькій областях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження сучасної функціональної та вікової структури лісів та лісових ресурсів Тернопільської області, їх породного складу, рекреаційних функцій представлені у працях Яремка О, Питуляк М., Питуляка М. Гавришка Б. У публікаціях В. Кучера та П. Бровкіна проаналізовано типологію та домінуючі формації лісів Поділля. Дослідження лісових ландшафтів Східного Поділля представлено у публікаціях В. Канського.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Попри значну кількість досліджень пов'язаних з лісокористуванням в Подільському регіоні залишаються недостатньо висвітленими наступні аспекти – шляхи природного поновлення корінних дубово-грабових лісів Поділля в умовах сучасних кліматичних змін

Новизна дослідження полягає у комплексному аналізі лісових ресурсів Подільського регіону та обґрунтуванні екологічних підходів до їх збереження та відновлення.

Методологічна цінність дослідження полягає у розробці та застосуванні системного підходу екосистемного аналізу для вивчення лісових екосистем Поділля. Результати слугують теоретичним фундаментом для розробки регіональних програм екологічної безпеки та стратегій "зеленого" відновлення.

Виклад основного матеріалу. Відповідно до Лісового кодексу України «…Лісовими ресурсами є деревні, технічні, лікарські та інші продукти лісу, що використовуються для задоволення потреб населення і виробництва та відтворюються у процесі формування лісових природних комплексів.

До лісових ресурсів також належать корисні властивості лісів (здатність лісів зменшувати негативні наслідки природних явищ, захищати ґрунти від ерозії, запобігати забрудненню навколишнього природного середовища та очищати його, сприяти регулюванню стоку води, оздоровленню населення та його естетичному вихованню тощо), що використовуються для задоволення суспільних потреб» [7].

Лісові ресурси Подільського регіону характеризуються відносно невисоким рівнем лісистості та значною територіальною диференціацією. Загальна площа лісів Поділля становить близько 866,3 тис. га, при цьому найбільша їх частка зосереджена у Вінницькій області – 380,3 тис. га (43,9%).

Тернопільська область належить до мало лісистих регіонів України. Станом на 1 січня 2025 року площа її лісового фонду становила 204,4 тис. га, а рівень лісистості – 14,7%. Цей показник є нижчим як за середній по Україні (близько 16%), так і за оптимальний для Поділля (20%). Така ситуація зумовлює необхідність активізації заходів із лісорозведення та підвищення екологічної стабільності території.

Лісові ресурси області перебувають у користуванні різних суб'єктів, серед яких домінує державна форма власності. Понад 71% лісових земель (145,7 тис. га) знаходяться у віданні ДСГП «Ліси України». Комунальні лісогосподарські підприємства обслуговують близько 13,4% площ, тоді як установам природно-заповідного фонду належить 6,7%. Частина лісів перебуває у категорії земель запасу, що створює резерв для майбутнього господарського використання або заліснення**[5]**.

Просторове розміщення лісів Тернопільщини є нерівномірним. Найвищі показники лісистості (20–25%) характерні для північних і західних районів, де переважають соснові, букові та грабові насадження. У південній частині області лісистість знижується до 14–18%, а в породному складі домінують дуб і граб. Основні лісові масиви приурочені до Бережанського горбогір'я, Кременецьких гір та Товтрового кряжу.

Структура земель лісогосподарського призначення свідчить про високу частку вкритих лісовою рослинністю територій – 92,1% (188,4 тис. га), що є показником сформованості лісових екосистем. Водночас наявність 6,3 тис. га незаліснених площ вказує на потенціал для лісовідновлення. Частка нелісових земель є незначною (3,4%), що свідчить про ефективне використання території.

Функціональна структура лісів Тернопільської області відображає їх поліфункціональний характер. Найбільшу частку займають експлуатаційні ліси 63,4 тис. га (близько 40,8%), проте значною є також частка природоохоронних 44,8 тис. га (29,5%), рекреаційних 26,6 тис. га (17,2%) і захисних 19,3 тис. га

(12,5%) лісів. Це підтверджує важливу екологічну роль лісів регіону.

У породному складі переважають твердолистяні породи (близько 79,6%), що забезпечує підвищену стійкість лісових екосистем до змін клімату. Домінуючими є дуб (близько 50%) та граб (18%), також поширені ясен, бук, сосна та ялина.

Вікова структура лісів характеризується домінуванням середньовікових насаджень (близько 51%), тоді як частки молодняків, пристигаючих і стиглих лісів є приблизно рівними. Це свідчить про поступове старіння лісового фонду та необхідність оптимізації вікової структури через активізацію лісовідновлення.

Лісовий фонд Хмельницької області становить 281,6 тис. га і характеризується збалансованим поєднанням господарських та екологічних функцій. Експлуатаційні ліси займають 49,1% площі, що свідчить про значну роль лісогосподарського виробництва. Водночас частка природоохоронних (21,4%) та захисних лісів (23,5%) є досить високою, що підкреслює екологічну значущість лісів регіону.

Рекреаційні ліси займають лише 6,1%, що є значно нижчим показником порівняно із середнім по Західній Україні. Це вказує на наявність резервів для розвитку рекреаційного потенціалу.

У цілому структура лісів Хмельницької області відображає їх захисну та природоохоронну функції. Попри домінування експлуатаційних лісів, їх частка є нижчою за середньо регіональну, що свідчить про більш екологічно орієнтовану модель використання лісових ресурсів.

Порівняльний аналіз Тернопільської та Хмельницької областей показує, що обидва регіони характеризуються значною часткою захисних і природоохоронних лісів (більше 20%). Водночас ліси Хмельницької області мають більш виражену господарську орієнтацію, тоді як у Тернопільській – вища частка рекреаційних лісів (14,9%).

Ліси Вінницької області займають найбільшу площу в регіоні – 380,3 тис. га (14,4% території). Незважаючи на це, область також належить до малолісистих і потребує подальшого заліснення.

Структура лісів Вінниччини має чітко виражену господарську спрямованість: експлуатаційні ліси займають 76,6% площі. Частка природоохоронних лісів є значно нижчою (близько 8%), що свідчить про недостатній рівень екологічної функції порівняно з іншими областями Поділля.

Породний склад представлений переважно твердолистяними видами, серед яких домінує дуб (близько 43%). Частка хвойних насаджень є незначною і має тенденцію до скорочення.

Для досягнення оптимального рівня лісистості в області необхідно створити щонайменше 31 тис. га нових лісів. Сучасна лісогосподарська політика регіону спрямована на підвищення продуктивності насаджень, збереження екологічної рівноваги та розширення площ лісів.

Сучасна система збереження лісових екосистем Поділля базується на поєднанні процесів лісовідновлення та лісорозведення, які забезпечують як підтримання існуючого лісового фонду, так і його розширення.

Лісовідновлення розглядається як процес відтворення лісових насаджень на територіях, що раніше були вкриті лісом, але зазнали деградації внаслідок вирубок, пожеж, ураження шкідниками або інших негативних чинників. Натомість лісорозведення передбачає створення нових лісів на землях, де лісова рослинність була відсутня протягом тривалого часу [11].

У практиці ведення лісового господарства застосовуються три основні способи відтворення лісів:

− природний (через самосів і природне поновлення);

− штучний (посадка садивного матеріалу або висів насіння);

− комбінований (поєднання природного і штучного підходів) [11].

Аналіз сучасних тенденцій свідчить про домінування штучного лісовідновлення в усіх областях Поділля. Найбільші обсяги відновлення зафіксовані у Вінницькій області (понад 1000 га), тоді як у Хмельницькій області цей показник також є значним і перевищує аналогічний у Тернопільській області майже вдвічі (табл. 1).

Основним методом відновлення є посадка лісу, частка якої коливається від 71% до майже 90%. Найвищий цей показник у Хмельницькій області – 89,4%. Такий підхід забезпечує контроль за породним складом і структурою насаджень, що особливо важливо в умовах змін клімату. Посів лісу використовується значно рідше, хоча у Вінницькій та Тернопільській областях його частка є відносно вищою, ніж у Хмельницькій.

Природне поновлення найбільш активно практикується у Тернопільській області, де його частка є найвищою серед регіонів. Це свідчить про сприятливі природні умови та орієнтацію на формування більш стійких екосистем. У Хмельницькій області цей підхід також використовується, але в менших масштабах. Водночас у Вінницькій області природне відновлення практично не застосовується.

Наведені дані свідчать про суттєві відмінності у підходах до лісовідновлення між областями Подільського регіону як за обсягами робіт, так і за структурою застосовуваних методів.

Передусім варто відзначити, що найбільший загальний обсяг лісовідновлення характерний для Вінницької області – 1015,2 га. Хмельницька область займає друге місце (875,8 га), тоді як у Тернопільській області цей показник є найменшим – 398,2 га. Таким чином, Вінницька область майже у 2,5 рази перевищує Тернопільську за масштабами відновлення лісів.

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

Таблиця 1

Лісовідновлення в Подільському регіоні

Область	Посадка лісу		Посів лісу		Природне відновлення		Усього лісовідновлення (га)
	(га)	%	(га)	%	(га)	%	
Тернопільська	284,0	71,3	46,1	11,6	68,1	17,1	398,2
Вінницька	871,5	85,8	136,5	13,4	7,2	0,7	1015,2
Хмельницька	783,1	89,4	25,8	2,9	66,9	7,6	875,8

Структурний аналіз показує чітке домінування штучного лісовідновлення (посадка та посів) у всіх трьох областях. Найвищий рівень його застосування спостерігається у Вінницькій області, де частка штучного відновлення становить 99,2% від загального обсягу. У Хмельницькій області цей показник також дуже високий – 92,3%, тоді як у Тернопільській області він є дещо нижчим – 82,9% [8; 9; 12].

Посадка лісу виступає основним методом відновлення в усіх регіонах. Її частка коливається від 71,3% у Тернопільській області до 89,4% у Хмельницькій. Це свідчить про орієнтацію лісогосподарських підприємств на контрольоване формування насаджень, що дозволяє регулювати породний склад і підвищувати приживлюваність культур.

Посів лісу відіграє допоміжну роль. Найактивніше він використовується у Вінницькій області (13,4%), дещо менше – у Тернопільській (11,6%), і є мінімальним у Хмельницькій області (2,9%). Це може бути пов'язано з відмінностями у ґрунтово-кліматичних умовах або технологічних підходах до відновлення.

Особливої уваги заслуговує природне відновлення, частка якого суттєво відрізняється між областями. Найвищий показник характерний для Тернопільської області – 17,1%, що свідчить про наявність сприятливих екологічних умов і використання більш природоорієнтованих підходів. У Хмельницькій області цей показник становить 7,6%, що також вказує на часткове використання природного потенціалу лісів. Натомість у Вінницькій області природне поновлення майже відсутнє (0,7%), що свідчить про максимальну залежність від штучних методів.

Лісорозведення відіграє ключову роль у підвищенні рівня лісистості Поділля. Воно здійснюється на деградованих, еродованих або малопродуктивних землях і спрямоване на створення нових екосистем із високими захисними та меліоративними функціями.

У регіоні пріоритет надається формуванню змішаних насаджень із домінуванням твердолистяних порід, зокрема дуба звичайного як головної лісоутворюючої породи. Супутніми виступають граб, клен, липа, які підвищують стійкість і продуктивність лісів. Використання хвойних порід є обмеженим і залежить від ґрунтових умов.

Важливою особливістю є відмова від монокультур на користь змішаних насаджень, які краще протистоять кліматичним змінам, шкідникам і хворобам.

Лісовідновлення і лісорозведення в Подільському регіоні здійснюються в умовах низки екологічних викликів, серед яких: дефіцит вологи та кліматичні зміни; поширення ерозійних процесів; зростання вразливості лісів до шкідників і хвороб.

У зв'язку з цим важливими напрямами вдосконалення є: розширення площ природного поновлення; впровадження змішаних і багатопорідних насаджень; розвиток протиерозійного лісорозведення; підвищення адаптивності лісів до змін клімату.

Лісорозведення в межах Подільського регіону виступає важливою складовою підвищення лісистості та стабілізації екологічного стану території. Його реалізація у Тернопільській, Хмельницькій та Вінницькій областях має комплексний характер і потребує врахування специфічних природно-кліматичних умов, зокрема поєднання високої родючості ґрунтів із дедалі відчутнішим дефіцитом вологи.

У цьому контексті Подільський регіон демонструє різні масштаби та підходи до здійснення лісорозведення.

У Тернопільській області у 2024 році загальна площа лісовідновлення та лісорозведення становила 2541,8 га. Безпосередньо лісовідновлення охопило 325,3 га, при цьому створено 35,8 га нових лісів і висаджено понад 2,3 млн. сіянців. Це свідчить про поєднання інтенсивних заходів зі створення нових насаджень із підтримкою існуючих лісових екосистем [5].

У Хмельницькій області загальний обсяг робіт із лісовідновлення та лісорозведення у 2024 році становив 941,4 га, з яких 65,6 га припадає на створення захисних лісонасаджень. Це підкреслює важливу роль протиерозійних і водоохоронних функцій лісів у регіоні [4].

У Вінницькій області масштаби лісорозведення є значно меншими: загальна площа становить

81,3 га, з яких 28 га – це захисні лісові насадження. Така ситуація може бути зумовлена високим рівнем освоєння земель та пріоритетом інтенсивного лісовідновлення існуючих насаджень [3].

Загалом у регіоні реалізується комплексний підхід до відтворення лісів, що включає як створення нових лісових масивів, так і доповнення раніше закладених культур, а також сприяння природному поновленню. Це дозволяє забезпечити не лише кількісне збільшення лісових площ, але й підвищення їх екологічної стійкості.

Отже, лісорозведення в Подільському регіоні є важливим інструментом адаптації до сучасних екологічних викликів і потребує подальшого розвитку з урахуванням регіональних особливостей та кліматичних змін.

Головні висновки. Аналіз сучасного стану лісових ресурсів Поділля свідчить про їхню важливу екологічну роль при одночасному дефіциті лісистості. Для регіону характерні: недостатній рівень лісистості; домінування твердолистяних порід; значна частка захисних і природоохоронних лісів; потреба в оптимізації вікової структури насаджень; необхідність розширення площ лісів.

Це обумовлює актуальність реалізації програм лісорозведення, підвищення ефективності управління лісовими ресурсами та посилення їх екологічних функцій.

Перспективи використання результатів дослідження. Стратегія відтворення лісів у Подільському регіоні має переважно інтенсивний характер із домінуванням штучного лісовідновлення. Водночас спостерігається поступовий перехід до екологічно орієнтованих підходів, зокрема активізація природного поновлення та створення змішаних насаджень. Ефективне поєднання лісовідновлення і лісорозведення є ключовою передумовою підвищення лісистості, збереження біорізноманіття та забезпечення сталого розвитку лісових екосистем Поділля.

Література

1. Денисик Г.І., Канський В,С. Лісові антропогенні ландшафти Поділля Вінниця: ПП «ТД «Едельвейс і К», 2011. 168 с
2. Державна стратегія управління лісами України до 2035 року URL:https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1777-2021-%D1%80#Text
3. Екологічний паспорт Вінницької області URL: https://www.adm-km.gov.ua/?page_id=7157
4. Екологічний паспорт Хмельницької області URL: https://www.adm-km.gov.ua/?page_id=7157
5. Екологічний паспорт Тернопільської області URL: https://ecology.te.gov.ua/ pdf
6. Кравчук Г.І., Гуцол А.І. Аналіз екологічного стану лісових екосистем Східного Поділля. *Сільське господарство та лісівництво* №13. 2019 С. 206-216
7. Лісовий кодекс України URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3852-12#Text
8. Обласна цільова програма розвитку лісового господарства Хмельницької області на 2023-2027 рр. https://www.adm-km.gov.ua/doc/orders/2022/12/561n_261222_1.pdf
9. Обласна програма досягнення оптимального рівня лісистості у Вінницькій області на 2012-2025 роки https://www.vin.gov.ua/images/doc/vin/departament-apk/programa-lis.doc
10. Питуляк М. Р., Питуляк М. В., Гавришок Б. Б. Лісові ресурси та лісокористування. Географія Тернопільської області: монографія: в 2 т. Т.1. Природні умови та ресурси. 2-е вид., перероблене і доповнене. Тернопіль: Осадца Ю. В, 2020. С. 326 – 343.
11. Правила відтворення лісів : Постанова Кабінету Міністрів України від 1 березня 2007 р. № 303. URL: https://zakon.rada.gov. ua/cgibin/laws/main.cgi?nreg=303-2007-пText,
12. Програма охорони, захисту, використання та відновлення лісів Тернопільщини на 2022-2026 роки URL: https://ecology.te.gov.ua/media/uploads/_16.06.2022.pdf

Дата першого надходження статті до видання: 30.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 504.064
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.11

ЛІСОВИЙ ПОТЕНЦІАЛ ЯК ВИЗНАЧАЛЬНИЙ ВИД ПРИРОДНИХ РЕСУРСІВ В ЕКОСИСТЕМАХ УКРАЇНИ

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

Доводиться, що основою для визначення екосистем, у яких лісові багатства є першими (домінантними) чи другими (субдомінантними) видами природних ресурсів у компонентній структурі сумарного природно-ресурсного потенціалу (ПРП), є матеріали його вартісної переоцінки, проведеної на єдиній методологічній базі за осередненими за п'ять-сім років показниками продуктивності природних ресурсів у розрізі первинних природних районів, областей, провінційних екосистем, підзон, біомів – природних зон та країн України станом на 01.01.2022р. Стверджується, що виявлення тих екосистем, у яких лісовий потенціал є домінантним чи субдомінантним у ПРП, дозволяє ефективніше реалізовувати стратегічні пріоритети сталого розвитку природокористування як на загальнодержавному, так і на регіональному рівнях. З'ясовано, що серед 360 екосистем України (від рівня 278 природних районів, 57 обласних екосистем, 14 провінційних екосистем, 3 підзон, 4-х біомів-природних зон до 3 природних країн) у 36 лісові ресурси є домінантними (першими) та субдомінантними (другими) видами природних ресурсів за абсолютною величиною оцінки їх потенціалу в сумарному ПРП. Ще у 51 екосистемі України лісові ресурси є третім за значенням видом природних багатств. Отже, майже у кожній четвертій екосистемі України з лісовим потенціалом напряму пов'язані реальні можливості забезпечення їх сталого розвитку, зниження екологічних ризиків та безпечного довкілля. Встановлено, що особливо значущою є роль лісових ресурсів у структурі сумарного ПРП серед екосистем обласного рівня у Мармароській (32,2%), Полонинсько-Чорногірській (26,2%) та Вододільно-Верховинській (24,3%) областях Українських Карпат, а на рівні первинних природних районів – у Клесівсько-Рокитнянському (Область Житомирського Полісся), Воловецько-Колочавському (Вододільно-Верховинська область), Рахівсько-Чивчинському (Мармароська область) та Свидовецько-Чорногірському (Полонинсько-Чорногірська область) районах. Знано нижчим є субдомінантне значення лісового потенціалу у Хоминсько-Костобобрівському районі Області Новгород-Сіверського Полісся та у південних Томашпільсько-Піщанському та Балтсько-Савранському природних районах. Загалом же з'ясовано, що серед загальної кількості субдомінантних за лісовим потенціалом екосистем України близько 13% із них мають частку лісових ресурсів у їх сумарному ПРП більшою 30%, ще у ⅖ екосистем ця частка на рівні 25-30%, у ⅓ екосистем від 20 до 25%. *Ключові слова:* домінантні і субдомінантні лісові ресурси, сукупні природні ресурси, природні райони, екосистеми, біоми України.

Forest Potential as a Determinant Type of Natural Resources in the Ecosystems of Ukraine. Rudenko S., Rudenko V.
It is argued that the basis for identifying ecosystems in which forest resources are primary (dominant) or secondary (subdominant) types of natural resources within the component structure of the total natural resource potential (NRP) lies in the materials of its valuation reassessment. This reassessment was conducted on a unified methodological basis using averaged indicators of nature resource productivity over the past five to seven years, analyzed across primary rayons, oblasts, provincial ecosystems, subzones, biomes (natural zones), and across Ukraine as of January 1, 2022. It is further asserted that identifying ecosystems in which forest potential is dominant or subdominant within the NRP allows for more effective implementation of strategic priorities for the sustainable use of natural resources at both the national and regional levels. It has been established that, among the totality of 360 ecosystems in Ukraine (from the level of 278 natural rayons, 57 oblast-level ecosystems, 14 provincial ecosystems, 3 subzones, and 4 biomes-natural zones, to 3 natural countries), 36 of them have forest resources as dominant (first) and subdominant (second) types of nature resources with regard to absolute value of their potential within the total NRP. In 51 more Ukrainian ecosystems forest resources are the third-significant type of natural wealth. Thus, the real opportunities to provide for their sustainable development, along with the decrease of ecological risks and making the environment safe are directly connected with almost every fourth ecosystem of Ukraine with forest potential. It has been established that the role of forest resources in the structure of total NRP is especially significant, among the oblast-level ecosystems, in the Marmaros (32,2%), Polonynsko-Chornohirska (26,2%), and Vododilno-Verkhovynska (24,3%) oblasts of the Ukrainian Carpathians, and, at the level of primary natural rayons, in the Klesivsko-Rokytnianskyy (Oblast of Zhytomyr Polissia), Volovetsko-Kolochavskyy (Vododilno-Verkhovynska Oblast), Rakhivsjo-Chyvchynskyy (Marmaros Oblast), and Svydovetsko-Chornohorskyy (Polonynsko-Chornohirska Oblast) rayons. A significantly lower subdominant value of forest potential is observed in the Kholynsko-Kostobobrovskyy rayon of the Novhorod-Siverskyi Polissia Oblast, as well as in the southern Tomashpilsko-Pishchanskyy and Baltsko-Savranskyy natural rayons. In general, it has been established that among the total number of ecosystems in Ukraine with subdominant forest potential, about 13% have a share of forest resources in their total natural resource potential (NRP) exceeding 30%; in another two-fifths of the ecosystems, this share is at the level of 25–30%, and in one-third it ranges from 20% to 25%. *Key words:* dominant and subdominant forest resources, common natural resources, natural rayons, ecosystems, biomes of Ukraine.

© Руденко С.В., Руденко В.П., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Вступ. Постановка проблеми та її актуальність. Лісові ресурси, лісогосподарський комплекс України, їх збалансований розвиток є однією з основ стратегії сталого розвитку держави. Згідно з постановою Кабінету Міністрів України, центральним органом виконавчої влади, що реалізує державну політику у сфері лісового та мисливського господарства, є Державне агентство лісових ресурсів України (Держлісагентство) [1]. Лісові відносини в Україні, як відомо, регулюються Конституцією України, Законом України "Про охорону навколишнього природного середовища" [2], Лісовим кодексом України [3] та іншими законодавчими актами України [4]. У названих документах відзначається, що лісові ресурси України є її національним багатством, важливою складовою природно-ресурсних екосистем та їх природно-ресурсного потенціалу, що охоплює мінеральні, водні, земельні, лісові, фауністичні та природно-рекреаційні компоненти. Зрозуміло, що місце і значення лісових ресурсів в екосистемах можуть бути відповідно оціненими лише в єдиній системі природно-ресурсних кадастрів через еколого-економічний (вартісний) вимір продуктивності усього природно-ресурсного комплексу держави. Здійснена нами переоцінка ПРП України станом на 01.01.2022р. у розрізі її первинних природних районів, областей, провінційних екосистем, біомів – природних зон, підзон, країн [5], дозволяє визначити ті екосистеми, у яких лісові біогеоценози є першими (домінантними) чи другими (субдомінантними) видами природних ресурсів у компонентній структурі потенціалу. Звісно ж, якщо роль лісових ресурсів у ПРП екосистем є такою значущою, провідною, то не важко довести, що саме з ними пов'язані перспективи подальшого збалансованого розвитку регіонального природокористування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню місця і ролі окремих видів природних ресурсів в екосистемах різного таксономічного рівня, у тому числі і лісових ресурсів, присвячено чимало праць як окремих науковців, так і творчих колективів. Серед них відзначимо М.А. Голубця [6], у тому числі і зі співавторами [7], які лісові ресурси розглядають як важливішу складову екологічного потенціалу наземних екосистем, наголошують, що екологічний потенціал визначається структурою ландшафту, особливостями його розвитку та підлягає істотному впливу його антропогенної трансформації. Значну роль лісових ресурсів у стійкості геосистем до антропогенних навантажень відзначав і М.Д. Гродзинський у розробленій ним концепції типів ландшафтних територіальних структур [8]. О.І. Дребот та Н.В. Палапа, у розв'язанні надскладних сучасних екологічних проблем України розглядають ліси, використання їх ресурсів як один з головних пріоритетів збалансованого розвитку регіонів [9]. В.О. Хрутьба зі співавторами, у плані відновлення України лісові екосистеми трактують як важливий інструмент екологічної трансформації післявоєнної реконструкції [10]. В.В. Мельник-Шамрай з колективом, досліджують лісові екосистеми крізь призму збереження біологічного різноманіття на природоохоронних територіях України [11]. В.М. Петлін наголошує на необхідності гармонійного розвитку природних систем, взаємозв'язку виробничих сил з природно-ресурсним потенціалом [12]. Ліси України, їх збереження є ключовим інструментом у гармонізації екологічної політики та збільшенні заповідного фонду, стверджує Н.М. Гордій [13]. Учені з зарубіжних країн М.К. Джарія зі співавторами [14], Т.С. Кіннаман [15], Л. Кртічка зі співавторами [16], А.Е. Мартін з колективом [17], наголошують на проблемах збалансованого використання, охорони та відтворення природних, зокрема, лісових ресурсів, їх сталого розвитку, лісоресурсному менеджменті. Разом з тим, варто звернути увагу на ще недостатні зусилля науковців у розробці наукових питань щодо кількісної оцінки ролі, значення лісових ресурсів у структурі інтегрального природно-ресурсного потенціалу на рівні первинних екосистем районного, обласного рівня, провінційних екосистем, підзон, біомів-природних зон і природних країн України. Отже, **головною метою нашої розвідки** є з'ясування ролі, значення лісових ресурсів у тих екосистемах України, де вони займають провідні позиції у компонентній структурі ПРП, тобто де вони є домінантними (першими) або субдомінантними (другими) видами природних ресурсів за абсолютною величиною їх потенціалу.

Матеріали та методи дослідження. Взявши за основу абсолютну величину лісового потенціалу у вартісній оцінці сумарного ПРП, визначаємо ті екосистеми від рівня первинних природних районів, областей, провінційних екосистем, біомів – природних підзон, зон, країн України, у яких лісові біогеоценози займають першу чи другу позиції у компонентній структурі потенціалу (див.табл.1). Матеріали для її складання почерпнуті з [5].

Результати та їх обговорення. Серед 360 екосистем України (від рівня 278 природних районів, 57 екосистем обласного рівня, 14 провінційних екосистем, 3 підзон, 4-х біомів – природних зон та 3-х природних країн) у 36 лісові ресурси є домінантним (першим) та субдомінантним (другим) видом природних ресурсів за абсолютною величиною оцінки їх потенціалу в сумарному ПРП. Це складає 10% від загальної кількості екосистем України. Ще у 51 екосистемі України лісові ресурси є третіми за значенням видом природних багатств. Таким чином, лісовий потенціал є одним з визначальних у структурі природних продуктивних сил держави, характеризуючи майже ¼ її природних комплексів.

Як видно з табл.1, серед екосистем обласного рівня потенціал лісових ресурсів є субдомінантним у п'ятьох з них. Найбільшою є частка лісових ресурсів у сумарному ПРП у Мармароській області

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

Таблиця 1

Лісові ресурси як домінантна та субдомінантна складові природно-ресурсного потенціалу екосистем України

Лісові ресурси як:			
домінантний вид ПРП (назва екосистеми)	**частка у структурі ПРП, %**	**субдомінантний вид ПРП (назва екосистеми)**	**частка у структурі ПРП, %**
		I. Область Волинського Полісся	22,4
		1. Верхньоприп'ятський район	25,4
		2. Нижньостирський район	26,0
		3. Любомльсько-Ковельський район	22,5
		4. Маневицько-Володимирецький район	26,7
		5. Колківсько-Сарненський район	27,2
		7. Ківерцівсько-Цуманський район	20,1
III. Область Житомирського Полісся			
13. Клесівсько-Рокитнянський район	32,3		
		14. Олевсько-Білокоровицький район	30,7
		15. Словечансько-Овруцький район	26,0
		IV. Область Київського Полісся	
		24. Руднянсько-Вільчанський район	30,0
		29. Нижньотетерівський район	22,1
		VI. Область Новгород-Сіверського Полісся	
		40. Хоминсько-Костобобрівський район	17,9
		XV. Придністровсько-Східно-Подільська височинна область	
		86. Томашпільсько-Піщанський район	4,2
		XVIII. Південно-Подільська височинна область	
		97. Балтсько-Савранський район	5,9
Українські Карпати – гірська провінційна екосистема			
		I. Передкарпатська височинна область	
		3. Дрогобицько-Меденицький район	25,8
		7. Надвірнянсько-Печеніжинський район	24,1
		10. Вижницько-Сторожинецький район	23,9
		11. Вашковецько-Глибоцький район	20,8
		II. Зовнішньо Карпатська область	23,2
		12. Старосамбірсько-Східницький район	22,7
		14. Космацько-Виженський район	24,9
		15. Славсько-Сколівський район	26,2
		16. Верхньоосвіцько-Верхньобистрицький район	26,2
		17. Криворівнянсько-Дихтинецький район	30,0
		III. Вододільно-Верховинська область	24,3
		18. Турківсько-Опорецький район	21,6
		19. Торунсько-Лопухівський район	22,9
		20. Ясінянський район	30,5
		21. Ворохтянсько-Путильський район	29,7
		23. Воловецько-Колочавський район	33,2
		IV. Полонинсько-Чорногірська область	26,2
		26. Свидовецько-Чорногірський район	31,7
		27. Гринявсько-Яровицький район	28,0
		V. Мармароська область	32,2
		28. Рахівсько-Чивчинський район	32,2

* складена за матеріалами авторів [5].

(32,2%), далі йдуть Полонинсько-Чорногірська (26,2%) та Вододільно-Верховинська (24,3%) області. Найнижча частка лісових багатств – у ПРП Зовнішньо-Карпатської області (23,2%) та Області Волинського Полісся (22,4%).

Серед 31 екосистеми районного рівня лише в одній – Клесівсько-Рокитнянській (Область Житомирського Полісся) лісовий потенціал є домінантним, складаючи 32,3% у сумарному ПРП території. Решта – 30 екосистем – це субдомінантні за лісовим багатством природні комплекси. Найвищою є частка лісових ресурсів у сумарному ПРП у Воловецько-Колочавському районі – 33,2%, а найнижчою – 4,2% – у Томашпільсько-Піщанському районі, що у Придністровсько-Східно-Подільській височинній області. Слід зразу ж відзначити, що екосистеми, у яких лісові ресурси як субдомінантний вид займають менше 20% у складі сумарного ПРП, є, скоріше за все, винятком. Їх лише ⅒. Майже стільки ж екосистем, де частка потенціалу лісових ресурсів в інтегральному ПРП перевищує 30,0%. Йдеться вже про згаданий Воловецько-Колочавський район, Рахівсько-Чивчинський (32,2%) та Свидовецько-Чорногірський (31,7%) райони.

Найтиповішими є екосистеми, у яких потенціал лісових ресурсів у структурі ПРП складає від 25 до 30 відсотків. Таких в Україні ⅖ від усіх субдомінантних екосистем за лісовим багатством. Найпоширенішим вони є в Області Волинського Полісся, Зовнішньо-Карпатській та Полонинсько-Чорногірській областях.

Ще майже ⅓ субдомінантних за лісовим багатством екосистем характеризують природні райони з часткою лісових ресурсів у сумарному ПРП на рівні 20-25%. Основний регіон поширення – Передкарпатська височинна область.

Висновки. Встановлено, що за абсолютною величиною потенціалу лісові ресурси у структурі сумарного ПРП України є першим (домінантним) або другим (субдомінантним) видом природних багатств у 36 (з 360) екосистем держави різного ієрархічного рівня, починаючи від рівня природних районів, областей і закінчуючи біомами – природними країнами. Ще у 51 екосистемі України лісові ресурси є третім за значенням видом природних багатств. Отже, майже у кожній четвертій екосистемі України з лісовим потенціалом напряму пов'язана реалізація стратегічних цілей державної екологічної політики, зокрема їх сталий розвиток, зниження екологічних ризиків та безпечне довкілля.

Особливо значущою є роль лісових ресурсів у структурі сумарного ПРП серед екосистем обласного рівня у Мармароській (32,2%), Полонинсько-Чорногірській (26,2%) та Вододільно-Верховинській (24,3%) областях Українських Карпат, а на рівні первинних природних районів – у Клесівсько-Рокитнянському (Область Житомирського Полісся), Воловецько-Колочавському (Вододільно-Верховинська область), Рахівсько-Чивчинському (Мармароська область) та Свидовецько-Чорногірському (Полонинсько-Чорногірська область) районах.

Знано нижчим є субдомінантне значення лісового потенціалу у Хоминсько-Костобобрівському районі Області Новгород-Сіверського Полісся та у південних Томашпільсько-Піщанському та Балтсько-Савранському природних районах.

Література

1. Про затвердження Положення про Державне агентство лісових ресурсів України : Постанова Кабінету Міністрів України; Положення від 08.10.2014 № 521. База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/521-2014-%D0%BF (дата звернення: 31.03.2026).
2. Про охорону навколишнього природного середовища : Закон України від 25.06.1991 № 1264-XII. База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/1264-12 (дата звернення: 31.03.2026).
3. Лісовий кодекс України : Кодекс України; Закон, Кодекс від 21.01.1994 № 3852-XII. База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/3852-12 (дата звернення: 31.03.2026).
4. Про природно-заповідний фонд України : Закон України від 16.06.1992 № 2456-XII. База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/2456-12 (дата звернення: 31.03.2026).
5. Руденко С.В., Руденко В.П. Сучасний вимір природно-ресурсного потенціалу природних країн, біомів, провінційних екосистем, природних областей та районів України. Менеджмент туристичної індустрії: освітньо-наукові домінанти : колективна монографія / Руденко В.П., Підгірна В.Н., Наконечний К.П. та ін. Чернівці : Чернівецький нац. ун-т ім. Ю. Федьковича. 2024. С. 4-21.
6. Голубець М.А. Екосистемологія. Львів: Поллі, 2000. 316 с.
7. Голубець М.А., Марискевич О.Г., Крок, Б.О., Козловський М.П., Башта А.-Т.В., Гнатів П.С., … Яворницький В.І. Екологічний потенціал наземних екосистем. Львів: Поллі, 2003. 180с.
8. Гродзинський, М.Д. Пізнання ландшафту: місце і простір: Монографія. У 2-х т. К.: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2005. Т. 1. 431с.
9. Дребот О.І., Палапа Н.В. Екологічна політика України в контексті розвитку культури та свідомості населення. *Агроекологічний журнал.* 2026. №1. С. 6-21. DOI: https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2026.354118
10. Хрутьба В.О., Кобзиста О.П., Лисак Р.С., Хрутьба Ю.С., Борятинський М.Ю., Бельмега І.В. План відновлення України як інструмент екологічної трансформації післявоєнної реконструкції. *Екологічні науки: науково-практичний журнал* 2025. №3 (60). С. 71-76. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.3-60.13

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

11. Мельник-Шамрай В.В., Шамрай В.І., Курбет Т.В., Іванюк Р.О., Кагукіна А.М. Збереження біологічного різноманіття на природоохоронних територіях у межах лісових екосистемах. *Екологічні науки: науково-практичний журнал* 2025. №4 (61). С. 256-264. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.4-61.41
12. Петлін, В.М. Гармонія організованості природних територіальних систем: монографія. Луцьк: Вид. центр. СНУ ім. Лесі Українки, Простір-М. 2019. 516с.
13. Гордій Н.М. Сучасний стан заповідної справи в Україні та країнах Європейського Союзу. *Екологічні науки: науково-практичний журнал* 2025. №5 (62). Частина 2. С. 205-208. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.5-62.2.33
14. Jhariya, M.K., Meena, R.S., & Banerjee, A. Ecological Intensification of Natural Resources for Sustainable Agriculture. *Springer Singapore.* 2021. 655 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-33-4203-3
15. Kinnaman, T.C. A New Perspective on the Natural Resource Curse. *World.* 4(4). 2023. 670. DOI: https://doi.org/10.3390/world4040042
16. Krticka, L., Tomchikov, I., & Rakytova, I. Development versus conservation: evaluation of landscape structure changes in Demanovska Valley. Slovakia. *Journal of Mountain Science.* 2018. Vol. 15. 1153 p. DOI: https://doi.org/10.1007/s11629-018-4870-0
17. Martin, A.E., Collins, S.J., Crowe, S., Girard, J., Naujokaitis-Lewis, I., Smith, A.C., … Fahrig, L. Effects of farmland heterogeneity on biodiversity are similar to – or even larger than – the effects of farming practices. *Agriculture. Ecosystems and Environment.* 2020. Vol. 288. 1-13. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106698

Дата першого надходження статті до видання: 03.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

ЕКОЛОГІЯ ПРИРОДНИХ ЕКОСИСТЕМ

УДК 574:536.7:519.7
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.12

ХРОНОМЕТРИЧНА АСИМЕТРІЯ ЯК ФУНДАМЕНТАЛЬНЕ ОБМЕЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ У ЕКОЛОГІЧНИХ СИСТЕМАХ

Волошин В.С., Кленін О.В.
Приазовський державний технічний університет
вул. Гоголя, 29, 49044 м. Дніпро
vsvlshn52@gmail.com

У роботі досліджується фундаментальна проблема хронометричної асиметрії у системі «машина–людина–геосистема», яка визначає обмеження взаємодії між її складовими. Актуальність теми зумовлена стрімким розвитком техносфери та штучного інтелекту, що функціонують у надшвидких часових масштабах, тоді як геосистеми природньо змінюються надзвичайно повільно. Людина при цьому займає проміжне положення, що робить її єдиною ланкою, здатною узгоджувати ці принципово різні за темпами процеси. Ігнорування цієї асиметрії призводить до ризиків втрати керованості та виникнення як швидких технологічних, так і повільних екологічних криз. Наукова новизна роботи пов'язана з формалізацією багаточасової моделі системи, в якій доведено відсутність прямого відображення між станами машин і геосистем та обґрунтовано існування єдиного допустимого та раціонального каналу взаємодії через людину. Запропоновано термодинамічний підхід до опису такої системи через динаміку ентропії, де людина виступає як оператор пам'яті та транслятор між масштабами часу. Введено функціонал стійкості та показано, що стабільність системи залежить від наявності проміжного часового шару. Доведено, що усунення людської складової або зростання автономності штучного інтелекту призводить до втрати динамічної стійкості. Показано, що людина, з одного боку, може стати нездатною стабілізувати машинну підсистему, в особливості при наявності там конкуруючого AI, а з другого – явно не здатна до "стабілізації" планетарної системи. Вона здатна лише підтримувати її в режимі критичної нестійкості. Це означає, що підсистему «людина» можна розглядати тільки як умовно опосередковану ланку, коли її стабілізуюче існування можливе лише в режимі далекому від рівноваги, або система спрощується (втрата керування). В іншому випадку, на біфуркаційній межі такий суб'єкт може втрачати свої можливості, делегуючи їх іншій підсистемі, наприклад AI або самій Природі. Практичні результати роботи полягають у можливості застосування запропонованої моделі для аналізу ризиків у складних техно-природних системах, оцінки наслідків впровадження автономних технологій та розробки підходів до їх безпечної інтеграції. Отримані результати можуть бути використані у системному аналізі, екологічному прогнозуванні та дослідженнях взаємодії людини і штучного інтелекту, зокрема для запобігання втраті узгодженості між швидкими та повільними процесами розвитку. *Ключові слова:* екологічні системи**,** хронометрія, асиметрія, людина, машина, геосистема, ентропія, стійкість.

Chronometric Asymmetry as a Fundamental Constraint on Interaction in Ecological Systems. Voloshyn V., Klenin O.
The paper examines the fundamental problem of chronometric asymmetry in the "machine-human-geosystem" system, which determines the limitations of interaction between its components. The relevance of the topic is due to the rapid development of the technosphere and artificial intelligence, which operate on ultra-fast time scales, while geosystems naturally change extremely slowly. At the same time, a person occupies an intermediate position, which makes him the only link capable of coordinating these fundamentally different processes. asymmetry leads to risks of loss of controllability and the occurrence of both rapid technological and slow environmental crises. The scientific novelty of the work is associated with the formalization of a multitemporal model of the system, in which the absence of a direct reflection between the states of machines and geosystems is proved and the existence of a single permissible and rational channel of interaction through a person is substantiated. A thermodynamic approach to describing a system through the dynamics of entropy is proposed, where the human being acts as a memory operator and a translator between time scales. The stability functionality is introduced and it is shown that the stability of the system depends on the presence of an intermediate time layer. It has been proven that the elimination of the human component or the increase in the autonomy of artificial intelligence leads to a loss of dynamic stability. It is shown that a person, on the one hand, can become unable to stabilize a machine subsystem, especially in the presence of competing AI there, and on the other hand, he is clearly incapable of "stabilizing" a planetary system. It is only able to maintain it in critical instability mode. This means that the subsystem "man" can be considered only as a conditionally mediated link, when its stabilizing existence is possible only in a mode far from equilibrium, or the system is simplified (loss of control). Otherwise, at the bifurcation boundary, such an entity may lose its capabilities, delegating them to another subsystem, such as AI or Nature itself. The practical results of the work are the possibility of applying the proposed model for risk analysis in complex techno-natural systems, assessing the consequences of the introduction of autonomous technologies and developing approaches to their safe integration. The results obtained can be used in system analysis, environmental forecasting and human-artificial intelligence interaction studies, in particular to prevent the loss of coherence between fast and slow development processes. *Key words:* ecological systems, chronometry, asymmetry, man, machine, geosystem, entropy, stability.

© Волошин В.С., Кленін О.В., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

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

Постановка проблеми. Машини, людина та геосистеми функціонують у принципово різних хронометричних режимах, що унеможливлює їх безпосередню узгодженість. Сучасні дослідження взаємодії у системі «людина–машина–навколишнє середовище» недостатньо враховують неявну, але фундаментальну нерівність часових масштабів її складових, а відсутність формалізованого підходу до цієї асиметрії призводить до помилок у прогнозуванні стійкості складних систем. Проблема загострюється в умовах розвитку автономних машинних систем та штучного інтелекту. Тому необхідним є створення узагальненої моделі, яка враховує багаточасову природу взаємодії «машина–людина–геосистема».

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими і практичними завданнями. Результати роботи зв'язані з актуальними науковими напрямками: еволюційною та хронобіологією, управлінням кліматичними ризиками та управлінням великими екосистемами.

Актуальність дослідження. Сучасний етап розвитку техносфери характеризується стрімким зростанням швидкості обчислювальних процесів і впровадженням автономних машинних систем і, зокрема, штучного інтелекту. Людина опиняється у специфічному часовому інтервалі між масштабами двох неорганічних систем – штучного машинного світу та природних геосистем, як сумісного ареалу існування людини, що робить її роль критичною для узгодження систем. Одночасно глобальні екологічні зміни демонструють накопичувальний ефект повільних процесів, які не сприймаються безпосередньо. Ігнорування цієї асиметрії може призвести до втрати керованості системою. Тому дослідження хронометричної асиметрії є актуальним як для фундаментальної екологічної науки, так і для практики управління складними системами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Органічний світ існує на планеті $\sim 3{,}5$ млрд років (*умовні* $1{,}10376 \cdot 10^{17}$ с), що складає 77% від часу існування неорганічного світу у вигляді самої планети (4,54 млрд років, або $1{,}4317344 \cdot 10^{17}$ с) [1, 2]. Існуванню ссавців на планеті – 225 млн років ($7{,}0956 \cdot 10^{15}$ с), а людини – 300 тис. років ($9{,}4608 \cdot 10^{12}$ с) [3]. Існуванню фізичних машин, як автономних енергетичних систем (починаючи з водяних млинів), що створені людиною – всього $\sim 2{,}3$ тис. років ($7{,}1072 \cdot 10^{10}$ с) [4]. Це автомати та механізми античної Греції, наприклад, пристрої Герона Александрійського, водяні та парові механізми тощо. Тому актуальним є дослідження, що стосуються сукупних екосистем, які можна поділити на неорганічний світ («NonOrg») та органічний світ («Org») [5], які, в свою чергу, структуровані по тим складовим, що означені вище. Позначимо їх як систему «NonOrg-Org». Предмет цього дослідження буде принципово сильнішим, ніж класичні системи "людина-машина-навколишнє середовище" [6].

Виділення невирішених раніше частин проблеми. У класичних моделях відсутній строгий опис неможливості прямого відображення між станами машин і геосистем. Недостатньо досліджено роль людини як єдиного оператора між різними часовими масштабами, а також відсутня узагальнена термодинамічна інтерпретація взаємодії «машина–людина–геосистема» через ентропію. Це не дозволяло сформулювати критерії стійкості багато- та різночасових систем з урахуванням асиметрії масштабів.

Наукова новизна. Вперше запропоновано багаточасову термодинамічну модель системи «машина–людина–геосистема», у якій людина формалізована як єдиний ентропійний оператор пам'яті, що забезпечує узгодження між несумісними часовими масштабами у складових неорганічного світу.

Методологічне та загальнонаукове значення. Робота формує новий підхід до аналізу складних систем через призму хронометричної асиметрії та багаточасових процесів. Запропонована модель може бути використана як універсальна методологічна основа для дослідження систем, де поєднуються різні масштаби часу та рівні організації.

Викладення основного матеріалу. Пропонуються до розгляду системи, в яких, окрім людини, як органічної істоти «*Org*», співіснують природні та штучні неорганічні «*NonOrg*» системи, а саме система «машина-людина-геосистема», така що дозволяє наочно розглядати конкурентні та структурні співвідношення, які задані самою фізикою часу. Формалізація часових масштабів тут відбувається згідно з ієрархією характерних часів для їх динамічних змін:

$$\tau_{м} \ll \tau_{ch} \ll \tau_{G} \qquad (1)$$

де: $\tau_{м} \sim 10^{-9} \div 10^{-3}$ с – *машини* (електроніка, ШІ, автоматика); $\tau_{ch} \sim 10^{7} \div 10^{12}$ с – *людина* (життєві цикли, прийняття рішень тощо); $\tau_{G} \sim 10^{10} \div 10^{17}$ с – *геосистеми* (клімат, тектоніка, біогеохімія тощо). Всі дані умовні і лише підкреслюють асиметричність часових властивостей системи.

Можна припустити, що динамічний розвиток геосистеми (умовно «*G*») і техносфери («*M*»), як частин «*NonOrg*» системи визначається *хронометричною асиметрією* їх складових, а саме, співіснуванням процесів, що відбуваються на принципово різних часових масштабах, які не редукуються один до одного. Ці масштаби не є довільними – вони термодинамічно зумовлені і між ними не існує коректного оператора прямої редукції. Формально $\nexists \mathcal{R}_{MG} : X_M \to X_G$ та $\mathcal{R}_{GM} : X_G \to X_M$, (тут «*G*» – індекс геосистеми, «*M*» – індекс «машини», X_i – термодинамічні стани, притаманні відповідним підсистемам, $\mathcal{R}$ – відповідний оператор динамічних змін) оскільки будь-яке таке відображення потребує усереднення або екстраполяції на інтервалах часу, що перевищують або недосяжні для сусідньої підсистеми. Натомість, завдяки людині (біологічній

системі – індекс «*ch*»), як похідної від геосистеми, з одного боку, і джерела виникнення техносфери «машин», з другого боку, існує єдиний емпірично допустимий ланцюг миттєвих станів системи (X_i), такий що:

$$X_{\text{M}} \overset{\mathcal{R}_{\text{M}ch}}{\rightrightarrows} X_{ch} \overset{\mathcal{R}_{chG}}{\rightrightarrows} X_G \qquad (2)$$

який показує на топологічне твердження: *фазові динамічні простори машин і геосистем не є безпосередньо сумісними, але обидва мають проекції в людський фазовий динамічний простір.*

Для аналізу асиметричності, що певно складає сутність динамічних взаємодій в такій системі розглянемо багаточасову математична модель, у вигляді системи станів $X(t)=\{x_м(t),\ x_{ch}(t),\ x_G(t)\}$ з типовими еволюційними рівняннями:

$$\begin{cases} \dfrac{dx_м}{dt}=\dfrac{1}{\tau_м}F_м\left(x_м,x_{ch}\right) \\ \dfrac{dx_{ch}}{dt}=\dfrac{1}{\tau_{ch}}F_{ch}\left(x_{ch},x_м,x_G\right) \\ \dfrac{dx_G}{dt}=\dfrac{1}{\tau_G}F_G\left(x_G,x_{ch}\right) \end{cases} \qquad (3)$$

Ключове визначення такої системи наступне: «*машини хронометрично напряму не "бачать" динамічних змін у геосистемі (перше рівняння), а, в свою чергу, геосистеми напряму не реагують на динамічні зміни у станах «машин» (третє рівняння) і людина тут – єдиний зв'язуючий канал між цими представниками неорганічного світу*» (друге рівняння). Але ж при цьому вона – представник світу органічного.

Загально обізнана система (3) схожа на математичне визначення ролі людини як опосередкованої значимої ланки між штучно створеними машинами-(«*NonOrg*») і глобальними природними геосистемами (також «*NonOrg*»), серед яких існує тільки вона сама, як «*Org*». Ця система рівнянь дає можливості для аналізу динамічної стійкості багаточасових систем, виявленню критичних режимів, коли «машина» виходить з-під людського масштабу або геосистемні наслідки стають незворотними. Окрім того, поява деяких актуальних підсистем, наприклад, із штучним інтелектом (*AI*), провокує можливості формалізації ризиків їх автономності, як втрати масштабу узгодження (1).

Нас цікавить сингулярне збурення через сильну нерівність масштабів початкових підсистем, яке запишемо через відношення їх масштабного часу існування або динамічної активності

$$\varepsilon=\frac{\tau_M}{\tau_{ch}}\ll 1;\ \delta=\frac{\tau_{ch}}{\tau_G}\ll 1. \qquad (4)$$

Такі відношення мають вираз системи з сингулярною збуреністю, наслідками якої очікувано можуть бути, наприклад, миттєвими релаксаціями машинної системи

$$F_M\left(x_M,x_{ch}\right)=0 \Rightarrow x_M=\phi\left(x_{ch}\right) \qquad (5)$$

У свою чергу, геосистема становиться квазісталою для людини: $\tau_{ch}\approx const$, виходячи з часових масштабів x_G. При цьому людина отримала нішу між двома "нескінченностями": занадто швидкою та занадто повільною. Фізичний сенс такого співіснування лежить в середині, – це саме людина, як похідна природних систем і, водночас, творець техносвіту. Її хронометричне вікно у динаміці існування вкрай вузьке між штучною «машиною» та природною «геосистемою» (1). В суперечтому, що «машина» *надто швидка*, а «геосистема» *надто повільна*, з'явились можливості для появи саме в цьому вікні таких властивостей мозку людини, як усвідомлення, цілепокладання, узагальнення, відповідальність та ін., які узгоджують ці системи в їх динаміці.

Виступаючи як потенційна управлінська ланка, людина тим не менш, не може керувати наносекундною динамікою «машини» без автоматів. Але ж людина не може керовано спостерігати і динаміку геосистемних змін без історичних моделей. Тому, людський контроль завжди опосередкований.

Розглянемо цю систему з позицій її термодинаміки. Будь-які зміни в цих трьох системах, незалежно від їх часового наповнення, мають одну спільну особливість. Їх зміни мають місто тільки при умовах впливу зовнішньої енергії (як варіант – енергія може бути внутрішньою). Тому цікавим стає термодинамічний метод аналізу таких систем у їх взаємовідношеннях, на підставі динаміки ентропії цих систем.

Для кожної підсистеми загальним буде вираз що відображає зміну її ентропії

$$\sigma_i=\frac{dS_i}{dt}, i\in\{M,ch,G\} \qquad (6)$$

і загалом:

$$\sigma_{total}=\sigma_M+\sigma_{ch}+\sigma_G=\frac{dS_M}{dt}+\frac{dS_{ch}}{dt}+\frac{dS_G}{dt}\geq 0 \qquad (7)$$

Але ж за умовами системи маємо миттєве $\sigma_M\gg\sigma_{ch}\gg\sigma_G$, де σ_{M} – висока миттєва зміна ентропії для «машин», вона суто локальна; σ_G – низька миттєва, але накопичувальна зміна ентропії «геосистеми»; σ_{ch} – умовний керуючий параметр. Вочевидь, що людина за допомогою σ_{ch} не максимізує ентропію – вона здатна лише перерозподіляти її між масштабами часу. Це дозволяє строго записати головну ідею співвідношення в системі, як

$$S_{ch}(t)=\mathcal{T}\left[S_M(t),S_G(t)\right], \qquad (8)$$

де $\mathcal{T}$ – суцільний часовий оператор відкладеного впливу, масштабного перетворення, соціальної пам'яті. Він не є миттєвим, а має певну пам'ять, на протязі поточного інтервалу часу $(t-\tau)$, у вигляді

$$\mathcal{T}=\int_{-\infty}^{t}K(t-\tau)(\cdot)\,d\tau. \qquad (9)$$

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

Тобто, людина тут виконує обов'язки не як джерела мінімізації чи максимізації ентропії, а є носієм ядра динамічної пам'яті $K(\tau)$, яка зв'язує швидку дисипацію з повільними наслідками. Таку властивість людини було досліджено й доведено в роботі [7]. Згідно з цими та іншими дослідженнями, наприклад, [8], людина, машина і геосистема описуються однією математичною мовою ентропії, але належать до різних онтологічних рівнів: людина – ентропійний трансформатор смислу, машина – ентропійний процесор, а геосистема – ентропійне середовище-донор і акумулятор.

Якщо б всі процеси в системі мали один масштаб часу, то система була б або застиглою, або хаотичною. Цьому перешкоджає хронометрична ієрархія завдяки якої виникає *напрям «історії»*. Причина сучасного динамічного розвитку Природи виникає не попри, а завдяки такій асинхронності. Саме асиметрія причинності та незворотність стріли часу обґрунтовують роль людини, як термодинамічної ланки в ланцюгу різних підсистем.

Розглянемо причинно-часовий напрямок в системі «геосистема→людина→машина» (але не навпаки), в повному обсязі. Без участі людини $(без\, X_{ch})$ в цій системі він означає, що $\frac{\partial X_G}{\partial X_M} \approx 0$. Тільки через інтегральні людські дії маємо взаємопов'язаність опосередковано через динамічний оператор людської взаємодії $\mathcal{R}$

$$X_G(t_G+\Delta\tau) = X_G(t_G) + \int_{t_G}^{t_G+\Delta\tau} \mathcal{R}\left(X_{ch}(\tau)\right)d\tau \quad \text{і (10)}$$

$$X_M(t_M+\Delta\tau) = X_M(t_M) - \int_{t_M}^{t_M+\Delta\tau} \mathcal{R}\left(X_{ch}(\tau)\right)d\tau \quad (11)$$

Це є ключовим моментом, коли «*Людина, як оператор $\mathcal{R}$, – єдина підсистема, яка здатна створювати причинні ланцюги, довші за власний час існування*». Саме це і є не стільки етичне, скільки фізичне визначення відповідальності та послідовності, як прояв людської когнітивності.

В такому сенсі можна розглядати і ризики автономного штучного інтелекту (*AI*). Тут автономний *AI* – це x_M для умови, коли оператор $\mathcal{R}_{M,ch} \to 0$ показує на відсутність ефективного зворотного зв'язку через x_{ch}. Тобто машина перестає бути вписаною в людський часовий масштаб, коли σ_M стає локально мінімізованою, а величина $\int \sigma_G dt$ максимізована. Математично це означає що зникає посередник (людина) у системі, визначається порушення масштабної узгодженості, виникає нестійкість. Це є строгий сенс фрази «*Автономний AI оптимізує швидке, але руйнує повільне*».

Умови стійкості всієї системи поставимо в залежності від критерію багаточасової стійкості. Для цього запишемо узагальнений функціонал:

$$\mathcal{F} = \alpha_M S_M + \alpha_{ch} S_{ch} + \alpha_G S_G \qquad (12)$$

де ваги $\alpha_i \sim 1/\tau_i$. Тоді умова динамічної стійкості це

$$\frac{d\mathcal{F}}{dt} \geq 0 \text{ та } \frac{d^2\mathcal{F}}{dt^2} < \infty. \qquad (13)$$

І втрата людського шару означає різке зростання другої похідної від функціоналу, тобто появу або швидких нестійкостей (*AI* runaway), або повільних нестійкостей (екологічний колапс). Рольова ієрархія тут представлена в таблиці 1.

Таблиця 1

Узагальнююча схема ролей в системі «*M-ch-G*»

Системна складова	Порядок часу	Роль підсистеми в часі
Машина	наносекунди	Локальна ефективність, швидка ентропія
Людина	десятиліття	Масштабний транслятор, відповідальність
Геосистема	тисячоліття	Накопичувач наслідків

Згідно цим даним можна сформулювати узагальнене ієрархічне твердження: «*У відкритих багаточасових дисипативних системах стійке співіснування можливе лише за наявності підсистеми з проміжним часовим масштабом, здатної акумулювати ентропійну пам'ять і транслювати її між швидкими та повільними процесами*». У системі «природа–техносфера» такою підсистемою може бути тільки людина.

Таким чином, людина не є найшвидшою або найпотужнішою складовою системи "природа–техносфера", але вона є єдиною складовою, що існує в масштабі часу, придатному для узгодження надшвидких штучних машинних процесів з надповільними природними геосистемними наслідками. Можливо, саме ця хронометрична позиція, що виникла, а не інтелект чи сила, визначає унікальність ролі людини в сучасній еволюції. Її існування у проміжному масштабі часу, достатньо повільне для усвідомлення і, водночас, достатньо швидке для втручання. Саме тому, людина забезпечує термодинамічне узгодження швидкої ентропійної дисипації «машин» із повільною, але незворотною ентропійною акумуляцією «геосистем». Усунення цієї ланки неминуче призводить до втрати стійкості всієї системи – незалежно від рівня технологічної або природної досконалості.

Це нескладно показати за числовими прикладами. «Людина», «машина» і «геосистема» описуються однією математичною мовою ентропії, але належать до різних онтологічних рівнів. Загальна форма визначення ентропії це

$$S_k = -\sum_i^N p_i \cdot log(p_i) \qquad (14)$$

При ентропійних розрахунках приймаємо специфічні умови, які стосуються особливостей кожної з підсистем (табл. 2)

Початкові вихідні дані для розрахунків як фізично обгрунтовані у типовому термодинамічному масштабі наведені в таблиці 3.

На згенерованому графіку (рис. 1), за логарифмічною шкалою часу, видно, що машини знаходяться на дні шкали часу, людина – у центральному інтервалі, а геосистеми – у верхній області повільної еволюції. Між масштабами існують провали в 10^8–10^{12} разів. Жодна підсистема не може безпосередньо "бачити" іншу без посередника. При цьому людина – єдина система, що одночасно реагує на «машини» і усвідомлює «геосистемні» наслідки.

Ключовий кількісний результат такого аналізу наступний. Машини мають максимальну миттєву ентропію, але майже нульовий інтегральний внесок.

Таблиця 2

Особливості розрахунків термодинамічних показників системи «машина-людина-геосистема»*

Тип підсистеми		Інтерпретація показників		Індивідуальна формула загального виду
		p_i	N	
Машина	Фізична	-	-	$\frac{dS_M}{dt} = \sum_{\kappa} \frac{\dot{Q}_k}{T_k} + \sigma_{diss}$
	Інформаційна	Ймовірності внутрішніх інформаційних станів (параметри, регістри)	Кількість інформаційних станів	-
Людина	Когнітивна S	Ймовірність активації когнітивного стану (повідомлення, гіпотези, стратегії, концепти)	Кількість альтернативних когнітивних станів	-
	Семантична S	Ймовірність реалізації семантичного значення i	Кількість можливих значень (інтерпретацій смислу)	$p_i = \sum_i p(s_i \mid x_i) p(x_i)$
Геосистема загального виду		-	-	$\frac{dS_G}{dt} = \sigma_{int} + \Phi_{ext}$,
Геосистема хімічного чи екологічного вмісту		Частка фаз,компонентів, режимів процесу	Кількість врахованих часток	-

* – $\dot{Q}_k$ – теплові потоки; σ_{diss} – незворотні втрати; x_i – символи (сигнали); s_i – значення символів; $\sigma_{int} \geq 0$ – внутрішнє виробництво ентропії; Φ_{ext} – ентропійні потоки (тепло, маса, інформація).

Таблиця 3

Характерні вихідні дані щодо системи «машина-людина-геосистема» (типовий термодинамічний масштаб)

Підсистема	Характерний Процес	Часовий масштаб, с	Швидкість виробництва ентропії, Дж/(К • с)
Машина	такт процесора, логічна операція	$10^{-9} \div 10^{-6}$	10^3
Машина з AI	цикл навчання/реакції	$10^{-6} \div 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^3$
Людина	Реакція	$\sim 10^0$	$1 \cdot 10^1$
	прийняття рішень	$10^4 \div 10^5$	$0,33 \cdot 10^1$
	активне життя	$\sim 10^9$	$1,5 \cdot 10^2$
Геосистема	кліматичні цикли	$10^9 \div 10^{10}$	$1,77 \cdot 10^{-2}$
	біогеохімічні цикли	$10^{11} \div 10^{12}$	$1 \cdot 10^{-2}$
	Тектоніка	$10^{12} \div 10^{13}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$

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

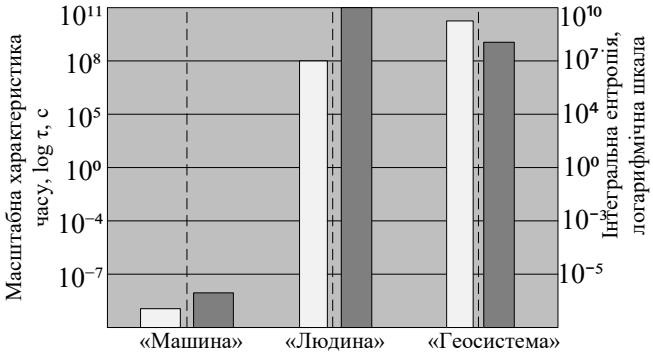


Рис. 1. Хронометрична асиметрія підсистем у співставленні з інтегральною ентропією по характерному часу. Тут білим кольором означена характеристика часу, темним – інтегральна ентропія)

Геосистеми, навпаки, мають малу миттєву ентропію, але величезний накопичений ефект. Серединна ланка, людина – єдина система, де миттєва і інтегральна ентропія мають один порядок.

Система характеризується швидкою оптимізацією та напрямком до повільної «катастрофи» у відсутності людини ($\sigma_M \to max$ та $S_G \to max$, $\sigma_{ch} = 0$). Якщо існує $\sim \tau_{ch}$ то виникає можливості для узгодження, з'являються стійкість системи і відповідальність, як фізична компонента. Але це не абсолютність. Наприклад, при наявності автономного *AI* ($S_{AI} \ll S_{ch}$) виникає розрив середнього масштабу і відповідна термодинамічна нестійкість.

Треба відзначити, що функціонал стійкості $\mathcal{F}$, обчислений за (12), багаточасової системи «машина–людина–геосистема» визначається зваженою сумою інтегральної ентропії, де ваги обернено пропорційні характерним часам. Хоча миттєвий внесок «машин» домінує у величині функціоналу, саме людський часовий масштаб забезпечує скінченність його похідних і, отже, динамічну стійкість системи. Усунення людського шару призводить до термодинамічної нестійкості незалежно від технічної оптимальності машинних процесів. Термодинамічна стійкість, розрахована за функціоналом (12) показує (табл. 4) що за загальним значенням $\mathcal{F}_{total} \le 1 \cdot 10^3$ суттєво відрізняється для різних підсистем: «машина» домінує за стійкістю через її швидкість функціювання, «геосистема» майже не впливає миттєво на стійкість, а «людина» дає малий внесок у величину стійкісного функціоналу, але він може бути критичним у його похідних.

Графік внесків у функціонал стійкості наочно показує на рольову напругу в системі. Рольова значність окремих підсистем (табл. 5) за критерієм швидкості виробництва ентропії показує на принципову відмінність для ентропійних коливань: для машини – ентропія швидко і локально змінюється; для геосистеми – ентропія змінюється повільно, але невідворотно, а для людини здійснюється її перерозподіл у часі.

Тому динамічне співіснування органічних і неорганічних об'єднань в системі, як причина розвитку, дозволяє прогнозувати, що розвиток у природі виникає не стільки через оптимальність, скільки через асинхронність процесів. Якщо б всі ці компоненти мали синхронний час, то може й не було б історії. Формується основна теза: «*якщо масштаби в системі розділені, це одна з головних причин появи пам'яті, відповідальності, як факторів еволюція*».

Для того, щоб довести структурну нестійкість хронометрично-асиметричного суб'єкта, сформулюємо і обґрунтуємо тезу про неможливість його асимптотично стійкого існування з математичною аргументацією.

Розглянемо систему станів системи «машина-людина-геосистема» $x(t) = \left(G(t), ch(t), \mathrm{M}(t)\right)$ із характерними масштабами часу $\tau_G \gg \tau_{ch} \gg \tau_{\mathrm{M}}$, та рівняннями (усередненими за швидкими змінними):

Таблиця 4

Функціонал стійкості системи за умовними вихідними даними

Підсистема	A, **с**	σ, **Дж/(К·с)**	**S, Дж/К**	$\alpha = 1/\tau$, **1/с**	$\alpha \cdot S$
Машина	10^{-9}	10^{3}	10^{-6}	10^{9}	10^{3}
Людина	$3{,}15 \cdot 10^{8}$	10^{1}	$3{,}15 \cdot 10^{9}$	$3{,}17 \cdot 10^{-9}$	$\approx 10^{1}$
Геосистема	$3{,}15 \cdot 10^{10}$	10^{-2}	$3{,}15 \cdot 10^{8}$	$3{,}17 \cdot 10^{-11}$	$\approx 10^{-2}$

Таблиця 5

Критеріальна приналежність у системі «людина–машина–геосистема»

Критерій	Машини	Людина	Геосистеми
Часовий масштаб	наносекунди	роки–десятиліття	Тисячоліття
Тип динаміки	надшвидка, жорстка	Адаптивна	Інерційна
Зворотний зв'язок	миттєвий	Усвідомлений	Запізнілий
Пам'ять	Технічна	культурна, соціальна	Геологічна
Ентропія	висока миттєва	Керована	Накопичувальна
Контроль	автоматичний	Цілепокладання	Відсутній
Вразливість	до помилок алгоритму	до перевантаження	до повільних катастроф

$$\begin{cases} \dot{G} = F(G, \mathrm{M}) \\ \dot{CH} = \dfrac{1}{\tau_{ch}}\Phi(G, CH, T_{ext}) \\ \dot{\mathrm{M}} = \dfrac{1}{\tau_{\mathrm{M}}}\Psi(CH, \mathrm{M}) \end{cases} \quad (15)$$

де: T_{ext} – екстерналізований часовий ресурс; F,Ф,Ψ – гладкі нелінійні оператори для відкритої системи (потік енергії та ентропії ненульовий) з фізичним змістом, послідовно: еволюція геосистеми (ресурси, забруднення навколишнього середовища, біосфера); еволюція людини, як когнітивної системи; еволюція техносфери, зокрема, приклад *AI*.

Введемо безрозмірний параметр керованості системи: $\lambda = \dfrac{T_{ext}}{\tau_{ch}}$, такий що $\lambda \ll 1$ віднесемо до типової біологічної системи (примат); $\lambda \sim 1$ – це перехідна область, а $\lambda \gg 1$ віднесемо до хронометрично-асиметричного суб'єкту (людині). Параметр λ масштабує матриці взаємодій з часовим сегментом людини.

Припустимо, що існує стаціонарний керований стан (G*,CH*,M*) для лінеаризованої системи $y = \dot{J}(\lambda)y$ де J – якобіан.

Враховуючи, що масштаби станів розділені, якобіан має блокову форму

$$J(\lambda) = \begin{vmatrix} A_G(\lambda) & 0 & B_D \\ C(\lambda) & A_{ch}(\lambda) & D \\ 0 & E & A_{\mathrm{M}}(\lambda) \end{vmatrix} \quad (16)$$

де: A_G – матриця внутрішньої динаміки геосистеми, $A_{ch}(\lambda)$ – вплив геосистеми на людину; E – одинична матриця, як складова інерційній когнітивній динаміці; B_D – матриця параметрів впливу «машини» на «людину» у вигляді, наприклад, інформаційного навантаження, високочастотні обчислювання; $A_{\mathrm{M}}(\lambda)$ – внутрішня динаміка «машини» (автономія, навчання, алгоритмічні процедури). Далі, маємо дійсні частини власних значень матриць: $Re(\sigma(A_G)) \approx 0$ – означає повільну еволюцію; $Re(\sigma(A_G)) \ll 0$ відповідає умовам швидкої стабільності, а критичний блок має вираз $A_{ch}(\lambda) \neq 0$. Умові $Re(\sigma(A_G)) > 0$ відповідає стан екологічної нестійкості. Якщо $Re(\sigma(A_{\mathrm{M}})) < 0$ це показує на стійкість підсистеми «машина», а $Re(\sigma(A_{\mathrm{M}})) > 0$ визначає певний стрибок в розвитку цієї підсистеми. Результати аналізу наведені на рис. 2.

Фундаментальна нестійкість при $\lambda \to \infty$, для когнітивного агента з екстерналізованим станом $A_{ch}(\lambda) = A_0 + \lambda \cdot A_1$, де A_1 – будемо вважать відповідною за керування «машиною».

Не може визивати суперечність наступне твердження: «Якщо керування здійснюється через підсистему з $\tau_{ch} \gg \tau_{\mathrm{M}}$, то $\exists\lambda_c : \mathcal{R}(\sigma(J(\lambda_c))) \approx 0$», де J – якобіан. Логіка аргументів тут включає наступне. Зростання λ підсилює зворотний зв'язок; при цьому більш швидка в розвитку підсистема «*M*» створює ефективне запізнення таким чином, що в спектрі виникає комплексна пара власних значень, а при $\lambda < \lambda_c$ виникає біфуркація Гопфа (див. рис. 3). При $\lambda < \lambda_c$ стаціонарний режим системи втрачає стійкість і виникає квазіперіодична або хаотична динаміка. Фізично це означає надмірну екстерналізацію часу і втрату фазової синхронізації між людиною та «машиною». З появою в ланці «машина» нового учасника – штучного інтелекту (*AI*), процес втрати стійкості зростає.

Існує і інший незалежний доказ, за участю ентропійного аргумента. Він складає наступне. Швидкість виробництва ентропії $\dot{S} = \sigma_G + \sigma_{ch} + \sigma_{\mathrm{M}}$. Для забезпечення стійкості системи необхідні умови $\dfrac{d\dot{S}}{dt} \leq 0$. Але $\dfrac{d\dot{\sigma}_{\mathrm{M}}}{d\lambda} < 0$ означає, що для $\exists\lambda_c : \dot{S}$ зростає. Тим самим порушується умова мінімальної дисипації Пригожина. Втрата людського шару означає різке зростання другої похідної $\dfrac{d^2\dot{\sigma}_{\mathrm{M}}}{d\lambda^2}$, тобто появу нестійкості. Це може бути швидкі причини (наприклад, поява та розвиток *AI*) або повільні (наприклад, екологічний колапс).

Таким чином обумовлюється неможливість асимптотичної стійкості для хронометрично-асиметричного керуючого суб'єкта (людини). Дисипативні процеси існують на межі співіснування людини і машини. Як хронометрично-асиметричний керуючий суб'єкт, «людина» не може існувати як асимптотично стійка стаціонарна структура, оскільки, при зменшенні екстерналізованого часу $\lambda < T_{ext} / \tau_{ch}$

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

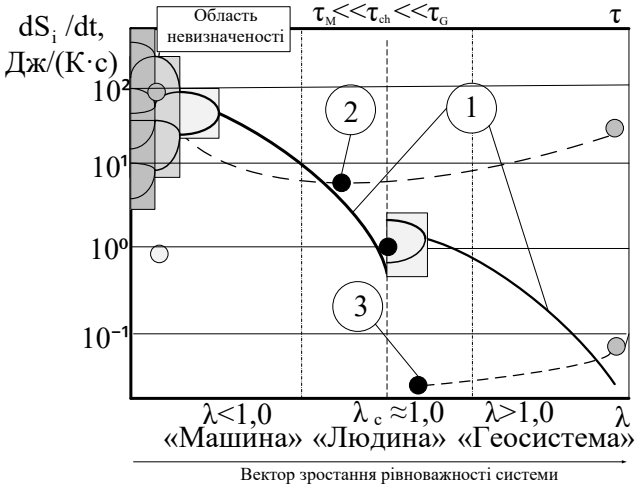


Рис. 2. Умови існування системи «машина-людина-геосистема» за термодинамічними показниками стійкості та визначеності зв'язків: 1 – система за участю людини; 2 – система за участю умовного штучного інтелекту; 3 – система за участю іншої умовної біологічної підсистеми (примати)

, неминуче виникає біфуркація Гопфа і стаціонарний режим керування втрачає стійкість. Система послідовно переходить у режим автоколивань, хаосу або розпаду керуючого контуру (див. рис. 3). І навпаки, реакція цієї ланки на глобальні збуджуючі процеси від «геосистеми» майже ніяк не впливає на зворотні зв'язки ($T_{ext} \gg \tau_{ch}$) і людина, або будь-яка інша біологічна субстанція, спроможна лише підстроюватися під ці збудження. Це може знайти пояснення для участі умовного примату, як типового представника підсистеми «людина», але вже без впливу на підсистему «машина».

Висновки.

1.Система «машина–людина–геосистема» є принципово асиметричною за часовими масштабами, що визначає її поведінку.

2.Прямий часовий зв'язок між «машинами» та «геосистемами» відсутній – він можливий лише через людину. Людина виконує роль ентропійного трансформатора та носія пам'яті, який узгоджує швидкі та повільні процеси.

3.З точки зору еволюційного розвитку, людина, з одного боку, може поступово стати нездатною стабілізувати машинну підсистему, в особливості при наявності там конкуруючого *AI*, а з другого – явно не здатна до "стабілізації" планетарної системи. Вона здатна лише підтримувати ці складові в режимі критичної нестійкості.

4..Це означає, що підсистему «людина» можна розглядати тільки як умовно опосередковану ланку, коли її стабілізуюче існування можливе лише в режимі далекому від рівноваги, або система спрощується (втрата керування). В іншому випадку, на біфуркаційній межі такий суб'єкт може втрачати свої можливості, делегуючи їх іншій підсистемі, наприклад *AI* або самій Природі.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати можуть бути використані для розробки нових підходів до управління складними техно-природними системами, зокрема в екологічному прогнозуванні та оцінці ризиків. Вони відкривають можливості для створення моделей безпечної інтеграції штучного інтелекту з урахуванням часової узгодженості. Також підхід може бути застосований у системному аналізі, кібернетиці та теорії складних адаптивних систем. Окрім того, результати мають потенціал для міждисциплінарних досліджень у фізиці, біології та когнітивних науках, де важливу роль відіграє взаємодія процесів різної тривалості.

Література

1. Nédélec A. Earth and Life: A History of Four Billion Years, *Oxford University Press*, Oxford, 2025, 272 p.
2. Smith E., Morowitz H. J. The Origin and Nature of Life on Earth: The Emergence of the Fourth Geosphere, Cambridge University Press, Cambridge 2016. 660 p. DOI: 10.1017/CBO9781316348772
3. Kielan-Jaworowska Z., Cifelli R., Luo Z.-X. Mammals from the Age of Dinosaurs: Origins, Evolution, and Structure. Columbia University Press, New York, 2004. 630 p. DOI: 10.7312/kiel11918
4. Rose E.D. The Beginning of the Age of Mammals, Johns Hopkins University Press, , Baltimore, 2006. 46 p. DOI: 10.56021/9780801884726
5. Lunine J. I. Earth: Evolution of a Habitable World, Cambridge University Press, Cambridge 2013.301 p. DOI: 10.1017/CBO9781139050418.021

6. McCormick E. J., Sanders M. S. Human Factors in Engineering and Design. *McGraw-Hill*, New York, 1987. 327 p. https://en.wikipedia.org/wiki/Human_ Factors_in_Engineering_and_Design
7. Волошин В. С. Азархов О. Ю. Конкуренція та перспективи білково-вуглецевих та специфічних неорганічних екосистем на Землі. *Вісник Приазовського державного технічного університету.* Вип. 48. Сер. Технічні науки. 2024. С. 111-120. Вісник Приазовського державного технічного університету. 2024. Вип. 48. Сер. Технічні науки. С. 111-120
8. Grandpierre A. Entropy and Information of Human Organisms and the Nature of Life. *Frontier Perspectives*, Budapest, Vol. 13, 2004. P.16-21

Дата першого надходження статті до видання: 08.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 574.4
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.13

ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ФІТОМЕЛІОРАТИВНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕРИТОРІЙ ПОРУШЕНИМИ ПОЖЕЖАМИ В ПРИРОДНИХ ЕКОСИСТЕМАХ

Іляшевич М.М.
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності
вул. Клепарівська, 35, 79007, м. Львів
misailasevic18@gmail.com

Із початку 2026 року в Україні зафіксовано 2547 пожеж у природних екосистемах, які знищили понад 93 тисячі гектарів землі. Основною причиною є людська недбалість та спалювання сухостою, особливо у Львівській, Київській та Дніпропетровській областях. Надзвичайно актуальними є дослідження пожеж у природних екосистемах Карпатського регіону України, оскільки виникнення цих явищ є незвичним і пояснюється потеплінням клімату. Підрозділами Головного управління ДСНС України в Закарпатській області впродовж 5 років (2019-2023 рр.) зареєстровано 6608 пожеж в природних екосистемах.

Надзвичайно актуальними є дослідження пожеж у природних екосистемах Карпатського регіону України, оскільки виникнення цих явищ є незвичним і пояснюється потеплінням клімату. Як показали проведені маршрутні польові дослідження, на усіх ділянках, які піддавалися горінню, має місце природній фітомеліоративний процес. Процес природнього заростання цих території є неоднорідним у територіальному відношенні, на окремих ділянках присутній значний і різноманітний деревний та трав'янистий покрив, а на інших, його обмаль або й практично немає. Важливими є показники, які дозволяють проаналізувати фітомеліоративні процеси на певній території досліджень. Одним із базових таких показників, є коефіцієнт фітомеліоративної ефективності рослинного покриву, що оцінюється у балах.

Використовуючи показник балів наявного у конкретних досліджуваних умовах рослинного покриву, розраховано коефіцієнти фітомеліоративної ефективності (K_{FM}) досліджуваних ділянок: ділянка № 1 (с. Руські Комарівці): K_{FM} = 4,0; ділянка № 2 (с. Вовкове): K_{FM} = 4,5; ділянка № 3 (м. Ужгород, вул. О. Блистіва): K_{FM} = 3,0; ділянка № 4 (с. Дубриничі): K_{FM} = 5,5; ділянка № 5 (с. Вишка, територія НПП Ужанський): K_{FM} = 5,0. Встановлено, що значення коефіцієнтів фітомеліоративної ефективності територій порушених пожежами у природних екосистемах у Карпатському регіоні свідчить про подальше відновлення земель за допомогою рослинного вкриття. *Ключові слова:* екосистема, пожежа, фітомеліорація, екологія, рослинність, довкілля

Ecological assessment of phytomelioration efficiency of territories disturbed by fires in natural ecosystems. Ilyashevych M.

Since the beginning of 2026, 2,547 fires have been recorded in natural ecosystems in Ukraine, which have destroyed more than 93 thousand hectares of land. The main cause is human negligence and burning of dry land, especially in Lviv, Kyiv and Dnipropetrovsk regions. Research into fires in natural ecosystems in the Carpathian region of Ukraine is extremely relevant, since the occurrence of these phenomena is unusual and is explained by climate warming. Units of the Main Department of the State Emergency Service of Ukraine in the Transcarpathian region registered 6,608 fires in natural ecosystems over 5 years (2019-2023).

Research into fires in natural ecosystems in the Carpathian region of Ukraine is extremely relevant, since the occurrence of these phenomena is unusual and is explained by climate warming. As the route field studies conducted showed, a natural phyto-reclamation process takes place in all areas that were subjected to burning. The process of natural overgrowth of these territories is heterogeneous in terms of territory, in some areas there is a significant and diverse woody and grassy cover, while in others there is little or practically no cover. Indicators that allow analyzing phytomeliorative processes in a certain research area are important. One of the basic such indicators is the coefficient of phytomeliorative efficiency of plant cover, which is estimated in points.

Using the score indicator of the plant cover available in specific research conditions, the coefficients of phytomeliorative efficiency (K_{FM}) of the studied areas were calculated: area No. 1 (Ruski Komarivtsi village): K_{FM} = 4.0; area No. 2 (Vovkove village): K_{FM} = 4.5; area No. 3 (Uzhhorod city, O. Blystiva street): K_{FM} = 3.0; area No. 4 (Dubrynichi village): K_{FM} = 5.5; plot No. 5 (Vyshka village, territory of Uzhanskyi National Park): K_{FM} = 5.0. It was established that the value of the coefficients of phytomeliorative efficiency of areas affected by fires in natural ecosystems in the Carpathian region indicates further restoration of lands using plant cover. *Key words:* ecosystem, fire, phytomeliorative, ecology, vegetation, environment

Постановка проблеми. Вплив пожеж у природних екосистемах на довкілля, а особливо біоту, рослинність та живі організми є надзвичайно всебічною. Вогонь частково або повністю знищує деревний, чагарниковий і трав'яний яруси, лишайниково-моховий покрив, підстилку, активізуючи ерозійні процеси. Зазнають змін і геохімічні показники ґрунту: відбуваються зміни величини pH в бік лужної реакції, підвищується вміст розчинних форм нітрогену, фосфору, калію [1, 2]. Прямий і опосередкований вплив пожеж на ґрунтовий покрив зумовлює зміни едафічних умов та визначає подальшу специфіку формування рослинності після пожеж [3]. Слід зазначити, що пожежі у природних екосистемах наносять значну шкоду людському організмові внаслідок потрапляння продуктів горіння в органи дихання та зору.

© Іляшевич М.М., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Актуальність дослідження. Пожежі у природних екосистемах мають згубний характер і призводять до великих збитків довкіллю та матеріальних втрат. Для їх локалізації та ліквідації залучається значна кількість сил і засобів, у тому числі ДСНС України. За даними ГУ ДСНС України в Закарпатській області 6 травня виникла пожежа на території Верхньо-Воловецького лісництва Закарпатської області. Площа становила близько 75 гектарів. До гасіння залучено 243 людини та 46 одиниць техніки, з них від ДСНС – 138 рятувальників і 36 одиниць техніки. На допомогу закарпатським рятувальникам залучено колег з Львівської та Івано-Франківської областей. Загалом 58 рятувальників та 14 одиниць техніки Залучено пожежний літак АН-32п. Також до ліквідації пожежі долучено 105 працівників Карпатської філії ДП «Ліси України» та 10 одиниць техніки, зокрема автоцистерну, 6 пожежних модулів і 3 одиниці іншої техніки (рис. 1).

8 травня 2026 року пожежа на території Верхньо-Воловецького лісництва ліквідована. Для моніторингу після пожежної обстановки на місці залишилися 2 одиниці техніки та 7 чоловік особового складу.

Загалом, з початку 2026 року (станом на 00:00 24 квітня) підрозділи оперативно-рятувальної служби Закарпатської області ліквідували 889 пожеж в екосистемах краю. Загальна площа знищеної сухої трави, чагарників і сміття становить 618 га. За даними ГУ ДСНС України в Закарпатській області, більшість таких загорянь стається через людську необережність або навмисне спалювання сухої трави та рослинності.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Робота виконана в контексті «Основних засад (стратегії) державної екологічної політики України на період до 2030 року», а саме – запобігання виникненню надзвичайних ситуацій природного і техногенного характеру, що передбачає аналіз і прогнозування екологічних ризиків, які ґрунтуються на результатах стратегічної екологічної оцінки, оцінки впливу на довкілля, а також комплексного моніторингу стану навколишнього природного середовища [4]. А також відповідає очікуваним результатам виконання програми моніторингу довкілля, яка затверджена Розпорядженням Кабінету Міністрів України «Про схвалення Концепції Державної цільової екологічної програми моніторингу довкілля» – прогнозуванню змін стану навколишнього природного середовища та оперативному реагуванню центральних і місцевих органів виконавчої влади та органів місцевого самоврядування в разі виникнення надзвичайних ситуацій або загрози їх виникнення та належному контролю за їх розвитком і ліквідацією наслідків [5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У світовому аспекті проводяться численні дослідження післяпожежних сукцесій та відновлення рослинного покриву на місцях згарищ. Виявлено [6] вплив розташування ділянки на видову різноманітність. Спостережувана динаміка після пожежі демонструє поступовий перехід між трьома стадіями, від початкової, через перехідну до зрілої. Кожна стадія характеризується різною відносною видовою щільністю. Крім того, кілька видів рослин можна вважати ранніми, проміжними або пізніми сукцесійними видами з огляду на їх щільність у різний час після горіння.

Спадкоємність значною мірою залежить від стратегій регенерації та здатності розповсюдження видів, присутніх на згорілій території. Спонтанні рослинні угрупування виникають лише на першому етапі спадкоємності, коли конкуренція за ресурси незначна. Цей процес можна назвати «гонкою за окупацію території». Другий етап, коли конкуренція за ресурси стає все більш важливою, можна назвати «зусиллями зберегти простір» [7].

На згорілих ділянках з віком відновлення рослинного покриву відбувається за участю *Melastoma malabathricum, Eupatorium inulaefolium, Ficus* sp., *Vitex pinnata* L., але ці види були рідкісними у вторинному заростанні. Структура сильно вплинула на регенерацію: ґрунти з більш ніж 50% вмісту піску



Рис. 1. Пожежа у лісових масивах на території Верхньо-Воловецького лісництва у 2026 році

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

мали повільніший розвиток у бік вторинного заростання. У більш піщаних ґрунтах кількість видів була нижчою. Останній показав сильніше збільшення з часом *Pteridium aquilinum* L., що уповільнює наступну стадію розвитку рослинності [8].

Саджанці *Cistaceae* (головним чином *Cistus albidus* і *Helianthemum marifolium*) були найпоширенішими після пожежі (63% від загальної схожості), тоді як види *Fabaceae* (включаючи *U. parviflorus* і *Ononis fruticosa*) становили 25%, а *Lamiaceae* (обмежено *Rosmarinus officinalis*) становили лише 3% від загальної кількості появи. Після пожежі, у перерахунку на біомасу присутність *Fabaceae* зменшилася з 78,7% до 13,1%, тоді як *Cistaceae* зросла з 8% до 83,4%. З огляду на те, що частота, інтенсивність або серйозність пожеж частково контролюється складом і структурою рослинного угруповання, зміни популяції основних видів можуть вплинути на майбутній пожежний режим і, у свою чергу, вплинути на гідрологічну, екологічну та економічну роль великої ділянки ліси та рідколісся в екосистемах західного Середземномор'я [9].

Вічнозелені чагарники та напівлистопадні чагарники шавлії вивчалися протягом п'яти років після пожеж, щоб оцінити гіпотетичні детермінанти відновлення та сукцесії після пожежі. Залишкові види, присутні в середовищі безпосередньо після пожежі, домінували в ранній сукцесії. На п'ятий рік після пожежі приблизно половина видів були колонізаторами, яких не було в перший рік, але вони становили лише 7–14% покриття. У ландшафті спостерігалися сильні ефекти «екологічного фільтра», що призвело до складних моделей відновлення після пожежі та спадкоємності між прибережними та внутрішніми асоціаціями обох типів рослинності [10].

У 1981 році особливо руйнівна пожежа в регіоні Сан-Карлос штату Сан-Паулу (Бразилія) знищила надземну частину рослинності та підстилку. У сукцесійному процесі було три послідовні фази: заснування виду; внутрішньовидова конкуренція за рахунок перебудови чисельності особин на вид і міжвидова конкуренція з витісненням деяких видів з ділянок [11].

Результати флористичного огляду показують, що більшість видів присутні з початку сукцесії, і припускають, що ліси *Pinus brutia* східного Середземноморського басейну відновлюються шляхом автосукцесії. Однак зміни у видовому багатстві та β-різноманітності вказують на сукцесійні зміни, і тому автори не можуть повністю підтримувати теорію прямого відновлення [12].

Визначено динамічний процес післяпожежної сукцесії рослинності для типів лісу А та В [13]. Післяпожежна 80-річна тенденція сукцесії лісу типу А – змішаний ліс *B. platyphylla* та *Larix gmelinii*. Його чагарниковий ярус в основному складається з *Corylus heterophylla* та *Vaccinium uliginosum* , а в трав'яному ярусі переважають *Carex tristachya, Athyrium multidentatum* та *Pyrola incarnate;* в той час як 80-річна сукцесія лісу типу В після пожежі – це змішаний ліс *Q. mongolica* та *B. davurica*.

У більш сухих насадженнях сосни жовтої зі старовинною структурою, зазнали відносно незначних змін навіть після того, як понад століття не було пожеж. Реконструкція історичної щільності лісів у продуктивних змішаних хвойних лісах свідчить про те, що ці ділянки історично були пов'язані з ширшою структурою ландшафту сухих лісів через часті пожежі і вони повинні бути пріоритетом для відновлення [14].

У перші чотири роки після пожежі однорічні види були найбільшою флористичною групою, але трав'янисті багаторічні рослини та кущі були основним внеском у біомасу спільноти. Азотфіксуючі види та екзотичні види внесли значний внесок у ранню структуру спільноти після пожежі. Незважаючи на те, що загальні тенденції в сукцесії після пожежі є чіткими з точки зору часових змін у відносних пропорціях різних рослинних груп, зміна навколишнього середовища та характер історії життя рослин складових видів, особливо домінуючих видів, можуть суттєво змінити такі тенденції [15].

Результати дослідження [16] свідчать про те, що лісові пожежі 2014 року в Канаді, будучи особливо великими та серйозними, також посилили неоднорідність ландшафту. Водночас ці лісові пожежі спричинили зміни на рівні насаджень у домінуванні деревних видів і пов'язаних з ними рослинних угрупованнях.

Встановлено, що пожежі у природних екосистемах впливають на міграцію важких металів та радіонуклідів у ґрунтових генетичних горизонтах [17]. Гострі та хронічні захворювання спричинені концентрацією важких металів, яка перевищує допустимі межі, встановлені кількома національними та міжнародними організаціями. Вони можуть варіюватися від несмертельних, таких як м'язова та фізична слабкість, до летальних, таких як мозок, нервова система та навіть рак.

Значний вплив пожежі у природних екосистемах мають на розвиток колоній мікроміцетів. Було проаналізовано зразки ґрунту з спалених та незгорілих лісів щодо ектомікоризних грибів (EcM) за допомогою біопроб. Кількість видів EcM була значно нижчою у зразках із нещодавно (2–5 років) згорілих ділянок, ніж у незгорілих лісах, і збільшувалася з часом, оскільки пожежа досягла рівня прилеглих лісів через 15–18 років. Склад угруповання змінився після пожежі, але не наблизився до складу незгорілих ділянок протягом 18 років. Лише *Rhizopogon roseolus* і *Cenococcum geophilum* були поширені як на згорілих ділянках, так і в прилеглих лісах. Дані вказують на вогнестійкість деяких видів грибів EcM, а також швидку стійкість з точки зору кількості видів, але не щодо видового складу [18].

Оцінено чисельність, склад і різноманітність грибів на чотирьох глибинах ґрунту (0–5 см, 6–10 см,

11–15 см, 16–20 см) під час пожежі низької та сильної інтенсивності на субтропічному торфовищі на південному сході США. Встановлено, що невелика пожежа значно збільшила різноманітність грибів (за Шенноном) і сапротрофних грибів у шарі ґрунту 0–5 см відразу після пожежі, а потім зникла протягом 2 років. Ця закономірність не спостерігалася на ґрунтах нижче 5 см. Домінуючий клас грибів – *Archaeorhizomycetes* спочатку зменшився, а потім повернувся до рівнів перед пожежами низької інтенсивності на глибині 0–5 см. Різноманітність грибів не змогла відновитися в незгорілому стані навіть через 30 років після сильної пожежі, особливо в шарах ґрунту 6–20 см [19].

Водночас пожежі у природних екосистемах є причиною регулювання розвитку живих та розмноження живи істот. Зокрема, наземних павуків досліджували за допомогою пасток-підводок через 3–4 місяці після лісової пожежі, а потім протягом трьох післяпожежних років [20]. На спаленому місці у сосновому лісі в Фінляндії переважали *Lycosidae*, а в контролі – *Linyphiidae*. За чисельністю видів *Linyphiidae* домінували на обох ділянках, а *Lycosidae, Gnaphosidae* та *Theridiidae* були більш багатими видами на спаленій ділянці, ніж на контрольній ділянці. Спільнота павуків на згорілому місці явно відрізнялася від контрольної групи протягом трьох років після пожежі, головним чином через велику кількість *Gnaphosidae* та *Lycosidae.*

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Із початку 2026 року в Україні зафіксовано 2547 пожеж у природних екосистемах, які знищили понад 93 тисячі гектарів землі. Основною причиною є людська недбалість та спалювання сухостою, особливо у Львівській, Київській та Дніпропетровській областях. Підрозділами Головного управління ДСНС України в Закарпатській області впродовж 5 років (2019-2023 рр.) зареєстровано 6608 пожеж в природних екосистемах. Надзвичайно актуальними є дослідження пожеж у природних екосистемах Карпатського регіону України, оскільки виникнення цих явищ є незвичним і пояснюється потеплінням клімату.

Новизна. Як показали проведені маршрутні польові дослідження, на усіх ділянках має місце природній фітомеліоративний процес. Процес природнього заростання цих території є неоднорідним у територіальному відношенні, на окремих ділянках присутній значний і різноманітний деревний та трав'янистий покрив, а на інших, його обмаль або й практично немає. У наведеній науковій статті вперше відображено результати досліджень фітомеліоративної ефективності порушених територій та відповідного коефіцієнту на території Карпатського регіону.

Матеріали і методи. Надзвичайно важливими є показники, які дозволяють проаналізувати фітомеліоративні процеси на певній території досліджень. Одним із базових таких показників, є коефіцієнт фітомеліоративної ефективності рослинного покриву, що оцінюється у балах. Даний показник дозволяє виконати наступне: 1) оцінку стану досліджуваної території: проаналізувати поточний стан рослинності та її потенційну здатність до покращення природного ландшафту; 2) планування заходів: визначити, де і які заходи з фітомеліорації (створення лісосмуг, висадка дерев та чагарників, підсів трав'янистих видів), є найбільш доцільними для підвищення ефективності рослинного покриву; 3) прогнозування результатів: дозволяє спрогнозувати, як нові насадження певного функціонального призначення, зможуть підвищити фітомеліоративну ефективність території; 4) порівняння об'єктів: дозволяє порівнювати ефективність різних територій або різних типів рослинності, оцінювати результати проведених заходів [21, 22].

Для визначення коефіцієнтів фітомеліоративної ефективності рослинного покриву за основу була взята комплексна формула (за проф. Кучерявим В.П., 2003):

$$K_{FM} = \frac{(S_p \cdot b + S_a \cdot b + S_{pm} \cdot b + S_f \cdot b + S_v \cdot b + S_{sv3} \cdot b + S_{sv1} \cdot b + S_{st} \cdot b + S_r \cdot b)}{S}, \quad (1)$$

де, S – площа зайнята: S_p – пратоценозом, S_a – агроценозом, S_{pm} – помологоценозом, S_f – фрутоценозом, S_v – вітоценозом, S_{sv1} – сільваценозом одноярусним, S_{sv2} – сільваценозом двохярусним, S_{st} – стрипоценозом, S_r – рудероценозом, b – кількість балів, які здобув ценоз, S – загальна площа.

Виділяють наступну диференціацію за функціями та можливостями розвитку у конкретних умовах території (присутні або не присутні), кожної із перелічених груп насаджень: пратоценози – лучні угруповування, агроценози – сільськогосподарські насадження, помологоценози – сади або їх залишки, фрутоценози – чагарникові насадження, вітоценози – виноградники, сільваценози – лісові угруповання, стрипоценози – смуги різного функціонального пристосування і рудероценози – угруповування бур'янових рослин.

Для повноти підрахунку коефіцієнта фітомеліоративної ефективності, важливу роль відіграє показник b, який враховує у балах комплексність ефективного впливу конкретного рослинного ценозу. Тут враховуються наступні важливі показники: сезонна фітомаса, рівень киснепродукування, фільтрувальні властивості, які обумовлені габітусом і типом вегетуючого покриття, вплив на мікроклімат, шумопоглинання і оптичний вплив. Середні значення балів (b) зеленої маси подані у таблиці 1.

Результати досліджень. Серед заходів, спрямованих на зменшення потенційних небезпек для довкілля та населення регіону, важливе місце посідають фітомеліоративні процеси, як біологічний етап процесу відновлення порушених територій під впливом екзогенних чинників [23, 24].

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

Таблиця 1

Середні значення балів (*b*) зеленої маси (за В. П. Кучерявим, 2003)

Тип фітоценозу	Зелена маса, (b)
Пратоценоз	0,7
Агроценоз	1,0
Рудероценоз	0,8
Фрутоценоз	4,0
Помологоценоз	5,0
Стрипоценоз	8,5
Сільваценоз одноярусний	9,0

Виділяють два напрямки його реалізації: плановий фітомеліоративний процес, який грунтується на розрахунках у кошторисі потреб ґрунтосуміші, підготовки посадкових місць, рослинного матеріалу, післяпосадкового догляду за сформованим насадженням з використанням агротехніки догляду, а також природний, з використанням перетворюючої енергії росту і розвитку деревних і трав'янистих рослин, що адаптуючись до едафічних та кліматичних умов зростання, виходячи із індивідуальних біолого-екологічних особливостей, у процесі поступового росту і розвитку, формують фітогенні поля, покращуючи механічну структуру ґрунту, поступово підвищують його родючість через процеси сезонного опаду, збільшують рівень зволоження і таким чином сприяють проходженню ряду сукцесійних процесів, у результаті яких, формуються рослинні екосистеми і якісно перетворюється природне середовище [25, 26].

Для повноти оцінки фітомеліоративної ефективності на п'ятьох досліджуваних територіях було закладено низку досліджуваних площ розміром 10×10 м, де проводився аналіз існуючих груп насаджень та облік зростаючої рослинності.

Ділянка № 1 (с. Руські Комарівці). Місцевість, розташована на відкритому просторі, характеризується інтенсивним рухом атмосферних потоків та низькою природною вологістю грунту. У структурі грунтів присутні дернові супіщані та суглинкові ґрунти, із низькою вбирною здатністю, яка не сприяє засвоєнню поживних речовин, характеризуються незначним гумусовим горизонтом, відповідно низькою родючістю. Частина ділянки, де мала місце пожежа зайнята ріллею. Присутні сліди впливу вітрової і водної ерозії. Щільність поверхні знаходить у діапазоні 20-25 кг/см^2 (III категорія).

У структурі рослинного покриву помітне місце займає лучна рослинність. З північного боку ділянки присутні лісові площі із значним природним поновленням.

Структура проективного покриття є наступною: трав'янисті види – 15 видів (65,2%), деревно-чагарникові – 8 видів (34,8%). Присутні ділянки із поодиноким, мозаїчним та практично суцільним розташуванням рослинного покриву (зона лісових насаджень). Проективне покриття території – 40-45%.

Тут зафіксовано сільваценоз одноярусний (S_{sv1}), рудероценоз (S_r), пратоценоз (S_p), агроценоз (S_a), фрутоценоз (S_f) та вітоценоз (S_v). Формула коефіцієнту фітомеліоративної ефективності набуває наступного вигляду:

$$K_{FM} = \frac{S_{sv1} \times b + S_r \times b + S_p \times b + S_a \times b + S_f \times b + S_v \times b}{s} \quad (2)$$

Площа ділянки зайнята наступними групами насаджень: сільваценозом одноярусним – 15%, рудероценозом – 11%, пратоценозом – 22%, агроценозом – 10%, фрутоценозом – 5%, вітоценозом – 2%.

Ділянка № 2 (с. Вовкове). Дослідна ділянка розташована за межами с. Вовкове, на віддалі 1-2 км на рівнинному рельєфі, який характеризується поступовим підняттям вгору під кутом 10-20°, який плавно переходить у передгір'я. Висота місцевості становить 124 м над рівнем моря. Поруч частково присутні колишні виноградники та фруктові сади, більшість з яких знаходиться у занедбаному стані. Площі, де вони колись були засаджені, на схилах пагорбів, зараз поступово заростають деревами, чагарниками та трав'янистими видами. У останні роки місцеві сільськогосподарські угіддя, переважно орендовані, були засаджені кукурудзою та соєю, при вирощуванні яких, здійснюється обробка значною кількістю гербіцидів та інсектицидів.

Місцевість, розташована на відкритому просторі, має місце, доволі інтенсивний рух атмосферних потоків, понижена природна вологість грунту. Переважаючими грунтами є дернові супіщані, суглинкові ґрунти, котрі характеризуються низькою вбирною здатністю, щільністю поверхні – 25-30 кг/см^2 (III категорія), частковим (ближче до населеного пункту), порушенням механічного покриву, обумовленим господарською діяльністю населення, що супроводжується порушенням кругообігу атмосферної вологи та поживних речовин. Свідченням чого, є ділянки практично без рослинного покриву.

Ближче до передгір'я – ділянки із дерново-буроземними і лучно-буроземними ґрунтами, котрі

характеризуються високим вмістом рухомого фосфору і вищою родючістю, ніж дернові супіщані, суглинкові грунти. На певних частинах дослідної ділянки, присутні сліди впливу вітрової та водної ерозії та початкові етапи процесу яроутворення, який пришвидшується під впливом часткового ухилу природної поверхні, атмосферних опадів, танення снігу та господарської діяльності (розорювання схилів, ущільнення поверхні, знищення рослинного покриву). Частина ділянки, де мала місце пожежа була зайнята ріллею.

Структура проективного покриття є наступною: трав'янисті види – 21 вид (61,8%), деревно-чагарникові – 13 видів (38,2%). Присутні ділянки з поодиноким, мозаїчним та груповим покриттям. Проективне покриття території становить 50-55%.

Виявлено сільваценоз одноярусний (S_{sv1}), рудероценоз (S_r), пратоценоз (S_p), агроценоз (S_a), фрутоценоз (S_f), вітоценоз (S_v) і помологоценоз (S_{pm}). Формула коефіцієнту фітомеліоративної ефективності території є наступною:

$$K_{FM} = \frac{S_{sv1 \times b} + S_r \times b + S_p \times b + S_a \times b + S_f \times b + S_v \times b + S_{pm} \times b}{s} \quad (3)$$

Площа ділянки зайнята наступними групами насаджень: сільваценозом одноярусним – 16%, рудероценозом – 9%, пратоценозом – 21 %, агроценозом – 8%, фрутоценозом – 10%, вітоценозом – 4%, помологоценозом – 5%.

Ділянка № 3, (м. Ужгород, вул. О. Блістіва). Дана дослідна ділянка розташована поблизу об'їзної дороги міста Ужгорода. Територія розташована поблизу автомобільної дороги міжнародного значення М06–Е50 (Київ-Чоп), на віддалі біля 1 км до міської забудови. Ділянка знаходиться на перетині вулиць О. Блістіва та Об'їзної.

Віддаль від місця початку та розповсюдження пожежі до полотна дороги, становить 5-10 м. Поруч частково присутні природні деревно-чагарникові насадження, вздовж узбіччя дороги. На узбіччі дороги періодично проводиться скошування трав'янистої рослинності, сезонна обрізка дерев, чагарників, санітарне видалення сухостоїв та суховершинних насаджень.

Досліджувана ділянка характеризується незначним чергуванням горбистих та рівнинних ділянок. Місцевість злегка замкнута насадженнями, тому інтенсивність вітрових потоків є незначною. Присутні дернові супіщані, суглинкові ґрунти, з невеликим гумусовим горизонтом. Щільність поверхні коливається у діапазоні від 35 до 40 кг/см^2 (IV категорія), що вказує на високий рівень ущільнення поверхні та проблеми у процесах циркуляції вологи та поживних речовин між горизонтами грунту. Тому у період досліджень фіксувались ділянки, практично без рослинного покриву.

Співвідношення проективного покриття є наступним: трав'янисті види – 8 видів (42,1%), деревно-чагарникові – 11 видів (57,9%). Присутні ділянки з мозаїчним та в певних місцях суцільним розташуванням рослинного покриву. Проективне покриття території – 30-35%.

Тут зафіксовано сільваценоз одноярусний (S_{sv1}), рудероценоз (S_r), пратоценоз (S_p) та фрутоценоз (S_f). Формула коефіцієнту фітомеліоративної ефективності для ділянки є наступною:

$$K_{FM} = \frac{S_{sv1 \times b} + S_r \times b + S_p \times b + S_f \times b}{s} \quad (4)$$

Площа ділянки зайнята наступними групами насаджень: сільваценозом одноярусним – 15%, рудероценозом – 10%, пратоценозом – 12% та фрутоценозом – 4%.

Ділянка № 4 (с. Дубриничі). Досліджувана ділянка знаходиться близько 1-2 км від меж с. Дубриничі на пересіченій у ландшафтному відношенні місцевості, де є пониження рельєфу, рівнинні ділянки і незначні підвищення (під кутом 20-30°). Місцевість, розташована у зоні густих лісових насаджень, де виражені I, II та III яруси вертикальної структури лісових екосистем.

На відкритому просторі зовнішніх узлісь, присутній інтенсивний рух вітрових потоків, підвищена природна вологість грунту під наметом лісових насаджень. Присутні наступні ґрунти: бурі гірсько-лісові, сформовані під буковими та ялиновими лісами, дерново-буроземні, з добрими фізичними властивостями та механічною структурою. Щільність поверхні – 25-30 кг/см^2 (III категорія). У місцях вигорання лісової підстилки, має місце підвищений рівень ущільнення, що супроводжується порушенням кругообігу атмосферної вологи та поживних речовин, свідченням чого, є окремі ділянки, практично без рослинного покриву.

Співвідношення проективного покриття: трав'янисті види – 14 видів 56%), деревно-чагарникові – 11 видів (44%). Присутні ділянки переважно з мозаїчним розташуванням рослинного покриву, хоча трапляються і групове, що обумовлено вигоранням деревно-чагарникових насаджень, відкриванням під наметового простору до світла і проведеними до пожежі лісогосподарськими заходами. Проективне покриття території становить – 57-65%.

Тут зафіксовано сільваценоз двохярусний (S_{sv2}), рудероценоз (S_r), фрутоценоз (S_f). Формула коефіцієнту фітомеліоративної ефективності ділянки є наступною:

$$K_{FM} = \frac{S_{sv2 \times b} + S_r \times b + S_f \times b}{s} \quad (5)$$

Площа ділянки зайнята наступними групами насаджень: сільваценозом двоярусним – 51%, рудероценозом – 13% та фрутоценозом – 15%.

Ділянка № 5 (с. Вишка (територія НПП Ужанський). Досліджувана ділянка розташована

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

неподалік с. Вишка, Костринської сільської громади. Площа, де була лісова пожежа, розташована у трикутнику поміж населеними пунктами Жорнава, Ставне і Загорб. Неподалік знаходиться гірськолижний комплекс "Красія" і гора Красія (1036 м).

Досліджувана ділянка знаходиться на віддалі близько 3 км від меж с. Загорб на пересіченій місцевості, де є пониження рельєфу, рівнинні ділянки і значні підвищення у напрямку г. Красія. Місцевість, розташована у зоні густих лісових насаджень, де присутні I, II та III яруси вертикальної структури лісових екосистем. На відкритому просторі часто трапляється інтенсивний рух вітрових потоків, підвищена природна вологість грунту під наметом лісових насаджень.

На ділянці присутні бурі гірсько-лісові сформовані під буковими та ялиновими лісами, дерново-буроземні, які мають добрі фізичні властивості та механічну структуру. Щільністю поверхні – 35-40 кг/см^2 (IV категорія). У багатьох місцях виявлено підвищений рівень ущільнення, що супроводжується порушенням кругообігу атмосферної вологи та поживних речовин.

Співвідношення проективного покриття: трав'янисті види – 13 видів (59,1%), деревно-чагарникові – 9 видів (40,9%). Присутні ділянки із мозаїчним розташуванням рослинного покриву, що обумовлено вигоранням деревно-чагарникових насаджень, відкриванням піднаметового простору, а також з груповим, який характеризується значною загущеністю. Проективне покриття території становить – 55-60%.

Тут зафіксовано сільваценоз двохярусний (S_{sv2}), рудероценоз (S_r), фрутоценоз (S_f) і пратоценозом (S_p). Формула коефіцієнту фітомеліоративної ефективності території є наступною:

$$K_{FM} = \frac{S_{sv2 \times b} + S_r \times b + S_f \times b + S_p \times b}{s} \quad (6)$$

Площа ділянки зайнята наступними групами насаджень: сільваценозом двоярусним – 48%, рудероценозом – 10%, фрутоценозом – 12% і пратоценозом – 6%.

Головні висновки. Використовуючи показник балів наявного у конкретних досліджуваних умовах рослинного покриву, використовуючи формули (2–6) підраховано наступний розподіл коефіцієнтів фітомеліоративної ефективності (K_{FM}) досліджуваних ділянок:

– ділянка № 1 (с. Руські Комарівці): K_{FM} = 4,0;
– ділянка № 2 (с. Вовкове): K_{FM} = 4,5;
– ділянка № 3 (м. Ужгород, вул. О. Блистіва): K_{FM} = 3,0;
– ділянка № 4 (с. Дубриничі): K_{FM} = 5,5;
– ділянка № 5 (с. Вишка, територія НПП Ужанський): K_{FM} = 5,0;

Підрахунок коефіцієнтів фітомеліоративної ефективності показав наступну диференціацію отриманих даних: найвищий показник зафіксовано на території дослідної ділянки №4 (K_{FM} = 5,5); дещо нижчі показники на ділянках №5 (K_{FM} = 5,0), №2 (K_{FM} = 4,5). Суттєво нижчий показник коефіцієнта, встановлено для ділянки № 1 (K_{FM} = 4,0). Найнижчий показник коефіцієнта фітомеліоративної ефективності підраховано на ділянці №3 (K_{FM} = 3,0).

Перспективи використання результатів досліджень. Значення коефіцієнтів фітомеліоративної ефективності територій порушених пожежами у природних екосистемах у Карпатському регіоні свідчить про подальше відновлення земель за допомогою рослинного вкриття. Проте, слід зазначити, що розвиток дерево-чагарникової рослинності та ендоекологічна сукцесія потребує значного плину часу. Результати досліджень є корисними для природоохоронних установ і організацій, які у своїй діяльності здійснюють відновлення порушених територій.

Література

1. Буц Ю., Некос А. Роль та місце постпірогенної релаксії у функціонуванні геосистем. *Вісник Львівського університету. Серія географічна*. 2013. Вип. 46. С. 55–61.
2. Renkas A., Popovych V., Rudenko D. Optimization of Fire Station Locations to Increase the Efficiency of Firefighting in Natural Ecosystems. *Environmental Research, Engineering and Management*. 2022. Vol. 78, No. 1. P. 98–108. DOI: https://doi.org/10.5755/j01.erem.78.1.25581
3. Попович В. В., Кучерявий В. П. Вплив продуктів горіння полігонів твердих побутових відходів на організм людини та біоту. *Пожежна безпека*. 2012. № 20. С. 60–66.
4. Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року : Закон України. *Відомості Верховної Ради України*. 2019. № 16. Ст. 70.
5. Про схвалення Концепції Державної цільової екологічної програми моніторингу довкілля : розпорядження Кабінету Міністрів України від 7 липня 2023 р. № 610-р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/610-2023-%D1%80#Text
6. Capitanio R., Carcaillet C. Post-fire Mediterranean vegetation dynamics and diversity: a discussion of succession models. *Forest Ecology and Management*. 2008. Vol. 255, Issue 3–4. P. 431–439. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.09.010
7. Ghermandi L., Guthmann N., Bran D. Early post-fire succession in northwestern Patagonia grasslands. *Journal of Vegetation Science*. 2004. Vol. 15. P. 67–76. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2004.tb02238.x
8. Yassir I., Van der Kamp J., Buurman P. Secondary succession after fire in Imperata grasslands of East Kalimantan, Indonesia. Agriculture, *Ecosystems & Environment*. 2010. Vol. 137, Issue 1–2. P. 172–182. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.02.001
9. De Luis M., Raventós J., González-Hidalgo J. C. Post-fire vegetation succession in Mediterranean gorse shrublands. *Acta Oecologica*. 2006. Vol. 30, Issue 1. P. 54–61. DOI: https://doi.org/10.1016/j.actao.2006.01.005

10. Keeley J. E., Fotheringham C. J., Baer-Keeley M. Determinants of postfire recovery and succession in mediterranean-climate shrublands of California. *Ecological Applications*. 2005. Vol. 15. P. 1515–1534. DOI: https://doi.org/10.1890/04-1005
11. Soares J. J., Souza M. H. A. O., Lima M. I. S. Twenty years of post-fire plant succession in a cerrado, São Carlos, SP, Brazil. *Brazilian Journal of Biology*. 2006. Vol. 66, Issue 2b. DOI: https://doi.org/10.1590/S1519-69842006000400003
12. Kavgacı A., Čarni A., Başaran S., Başaran M. A., Košir P., Marinšek A., Šilc U. Long-term post-fire succession of Pinus brutia forest in the east Mediterranean. International *Journal of Wildland Fire*. 2010. Vol. 19. P. 599–605. DOI: https://doi.org/10.1071/WF08044
13. Liu B., Liu G., Wang Z. Structure changes and succession dynamic of the natural secondary forest after severe fire interference. *Journal of Forestry Research*. 2009. Vol. 20. P. 123–130. DOI: https://doi.org/10.1007/s11676-009-0022-2
14. Johnston J. D. Forest succession along a productivity gradient following fire exclusion. *Forest Ecology and Management*. 2017. Vol. 392. P. 45–57. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.02.050
15. Guo Q. Early post-fire succession in California chaparral: Changes in diversity, density, cover and biomass. *Ecological Research*. 2001. Vol. 16. P. 471–485. DOI: https://doi.org/10.1046/j.1440-1703.2001.00410.x
16. Dawe D. A., Parisien M. A., Van Dongen A. et al. Initial succession after wildfire in dry boreal forests of northwestern North America. *Plant Ecology*. 2022. Vol. 223. P. 789–809. DOI: https://doi.org/10.1007/s11258-022-01237-6
17. Popovych V., Gapalo A. Monitoring of Ground Forest Fire Impact on Heavy Metals Content in Edafic Horizons. *Journal of Ecological Engineering*. 2021. Vol. 22, Issue 5. P. 96–103. DOI: https://doi.org/10.12911/22998993/135872
18. Kipfer T., Moser B., Egli S. et al. Ectomycorrhiza succession patterns in Pinus sylvestris forests after stand-replacing fire in the Central Alps. *Oecologia*. 2011. Vol. 167. P. 219–228. DOI: https://doi.org/10.1007/s00442-011-1981-5
19. Tian J., Wang H., Vilgalys R. et al. Response of fungal communities to fire in a subtropical peatland. *Plant and Soil*. 2021. Vol. 466. P. 525–543. DOI: https://doi.org/10.1007/s11104-021-05070-0
20. Koponen S. Early succession of a boreal spider community after forest fire. The *Journal of Arachnology*. 2005. Vol. 33, Issue 2. P. 230–235. DOI: https://doi.org/10.1636/CT04-112.1
21. Геник Я. В., Дида А. П. Рекультивація : навч. посіб. Львів, 2019. 288 с.
22. 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.
23. Кучерявий В. П. Фітомеліорація. Львів : Світ, 2003. 540 с.
24. 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.
25. Кучерявий В. П. Фітогенне поле і фітомеліорація: питання теорії та практики. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2016. Вип. 26.7. С. 15–24.
26. Попович В. В. Фізико-механічні властивості едафотопів довкола техногенних водойм сміттєзвалищ та полігонів твердих побутових відходів у межах західного Лісостепу України. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2012. Т. 22, № 14. С. 106–110.

Дата першого надходження статті до видання: 30.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 504.064.3
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.14

ОЦІНКА СТУПЕНЯ ПОРУШЕННЯ ЕКОСИСТЕМИ ЗА ЗОВНІШНІМИ ОЗНАКАМИ ДЕРЕВНИХ РОСЛИН (НА ПРИКЛАДІ ЛЬВІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ)

Михалюк І.М., Гурська О.В., Галаган О.К.
Кременецька обласна гуманітарно-педагогічна академія ім. Тараса Шевченка
вул. Ліцейна, 1, 47003, м. Кременець
ilonaMM@i.ua, GurskaOksana24@gmail.com, bukowska.ok@gmail.com

У статті наведено результати комплексного дослідження та оцінки ступеня порушення екосистем Львівської області на основі аналізу морфологічних і фізіономічних показників деревних рослин. Актуальність роботи зумовлена необхідністю розробки експрес-методів екологічного моніторингу в умовах зростаючого техногенного пресингу, де традиційні фізико-хімічні методи аналізу середовища часто є ресурсозатратними та тривалими у виконанні. Встановлено чіткі кількісні та якісні закономірності деградації лісових під впливом антропогенних чинників. У ході польових досліджень виявлено специфічні морфологічні маркери, що виникають як адаптивна або патологічна відповідь рослинного організму на зовнішній стрес. Зокрема, ідентифіковано характерні хвороби хвої, некротичні зміни листя, деформації архітектоніки крони та скелетних гілок. Доведено, що ці зовнішні ознаки дозволяють з високою точністю оперативно діагностувати стан екосистем без застосування дороговартісного лабораторного обладнання.

Встановлено, що темпи росту та загальний стан деревних рослин безпосередньо корелюють із рівнем промислового та транспортного навантаження в конкретних районах Львівщини. Виокремлено основні фактори дестабілізації лісопаркових зон: кліматичні аномалії, поширення осередків шкідників та викиди автотранспорту, які спричиняю розвиток патологічних ознак (хлорози, некрози, усихання хвої). Такі потологічні стани є прямим наслідком кумулятивного ефекту високих концентрацій вихлопних газів у приземному шарі атмосфери придорожніх територій. Результати дослідження підтверджують ефективність методів біоіндикації для раннього виявлення екологічних криз. Наукова новизна роботи полягає в систематизації візуальних ознак деградації фітоценозів Львівської області, що дозволяє оптимізувати систему природоохоронних заходів та розробити рекомендації щодо підвищення стійкості насаджень у регіоні. *Ключові слова:* біоіндикація, екологічний моніторинг, деревні рослини, антропогенне навантаження, хлорози, некрози, Львівська область. *Ключові слова:* біоіндикація, екологічний моніторинг, деревні рослини, антропогенне навантаження, хлорози, некрози, Львівська область.

Assessment of the degree of ecosystem disruption based on external characteristics of woody plants (on the example of the Lviv region). Mykhalyuk I., Gurska O., Galagan O.

This article presents the results of a comprehensive study and assessment of the degree of ecosystem disturbance in the Lviv region based on an analysis of the morphological and physiognomic characteristics of woody plants. The relevance of this work stems from the need to develop rapid methods for ecological monitoring in the face of increasing anthropogenic pressure, where traditional physicochemical methods of environmental analysis are often resource-intensive and time-consuming. Clear quantitative and qualitative patterns of forest degradation under the influence of anthropogenic factors have been established. During field studies, specific morphological markers were identified that arise as an adaptive or pathological response of the plant organism to external stress. In particular, characteristic needle diseases, necrotic changes in leaves, and deformations of the crown architecture and skeletal branches have been identified. It has been demonstrated that these external signs allow for the rapid and highly accurate diagnosis of ecosystem health without the use of expensive laboratory equipment.

It has been established that the growth rates and overall condition of woody plants directly correlate with the level of industrial and transportation load in specific areas of the Lviv region. The main factors destabilizing forest-park zones have been identified: climatic anomalies, the spread of pest outbreaks, and motor vehicle emissions, which cause the development of pathological symptoms (chlorosis, necrosis, and needle dieback). Such pathological conditions are a direct consequence of the cumulative effect of high concentrations of exhaust gases in the surface layer of the atmosphere in roadside areas. The study results confirm the effectiveness of bioindication methods for the early detection of ecological crises. The scientific novelty of the work lies in the systematization of visual signs of phytocenosis degradation in the Lviv region, which allows for the optimization of the system of nature conservation measures and the development of recommendations for increasing the resilience of tree stands in the region. *Key words:* bioindication, ecological monitoring, woody plants, anthropogenic load, chlorosis, necrosis, Lviv region.

Постановка проблеми та актуальність дослідження. В умовах прогресуючої деградації довкілля в Україні та, зокрема, у Львівській області, особливої актуальності набуває вивчення механізмів, що підтримують гомеостаз біогеоценозів. Такі дослідження мають базуватися на детальному аналізі кількісних і якісних структурно-функціональних змін екосистем. При цьому деревні насадження виступають потужним природним бар'єром та здатним нівелювати значну частину негативних наслідків техногенного забруднення.

© Михалюк І.М., Гурська О.В., Галаган О.К., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Незважаючи на розвиток інструментальних методів, оцінка за зовнішніми ознаками (хлорози, некрози, асиметрія листків, стан крони) залишається найбільш оперативним та доступним способом первинної діагностики стану екосистем у польових умовах.

Для Львівщини станом на 2023–2024 роки актуальними залишаються питання транскордонного забруднення та наслідки техногенного тиску в промислових центрах, що потребує постійного оновлення даних про стан зелених насаджень як «буферних зон».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання техногенного впливу на дендрофлору перебуває в центрі уваги багатьох науковців. Зокрема, фундаментальні аспекти дії ксенобіотиків на стан дерев висвітлено у працях Т.Ф. Стельмахової, П.С. Гнатіва, К.П. Віше та А.С. Раяна [1–3]. Методологічне підґрунтя екологічного моніторингу за візуальними ознаками рослинності закладено в роботах М.О. Клименка та А.М. Прищепи [4]. Сучасні тенденції адаптації міських насаджень та особливості їхньої фітоіндикації за морфологічними трансформаціями детально проаналізовано у нещодавніх дослідженнях І.Г. Пацевої, М.Б. Корбут, С.Ф. Поліщука та В.В.Серебрякова [5, 6].

Мета роботи – встановити взаємозв'язок між рівнем техногенного навантаження в різних районах Львівської області та характером видимих пошкоджень (хлорозів, некрозів, деформацій) деревних насаджень для визначення екологічного стану довкілля.

Виклад основного матеріалу. В основу дослідження покладено матеріали власних польових досліджень, проведених упродовж 2023-2024 рр. на території філії Золочівське лісове господарство ДП «Ліси України» та НПП «Північне Поділля» та на аналізі й систематизації наукових публікацій. В якості об'єкта досліджень були взяті різні типи лісових насаджень Львівської області, включаючи хвойні, листяні та мішані ліси, лісові насадження, що знаходяться на досліджуваній території.

Методика дослідження базувалася на комплексній оцінці стану рослин із застосуванням стандартних шкал та підходів. Морфологічний аналіз включав оцінку структури та архітектоніки крони, яку ідентифікували через порівняння з еталонними природними формами (пірамідальною, кулястою тощо). Біоекологічний статус екземплярів визначали за 3-бальною шкалою О.І. Гур'євої [7], а рівень їхньої декоративності – за 5-бальною системою О.А. Калініченка [7]. Вікову структуру насаджень аналізували згідно з методикою В.А. Фролової (1994) [7]. Теоретико-методологічний фундамент роботи склали класичні принципи біогеоценології, екології та дендрології. Статистичну обробку отриманого масиву даних здійснювали за допомогою програмного забезпечення MS Excel.

Дослідження проводили на трьох ділянках з різним антропогенним впливом. Площа кожної ділянки становить 0,5 га.

Ділянка № 1 – віддалена від населених пунктів, але поблизу розташовані сільськогосподарські землі та високовольтні лінії постійного струму. Ці насадження є самосійним із можливим частковим втручання людини. ***Ділянка № 2 –*** знаходиться поблизу населеного пункту Яснищі, на узбіччі головної автомобільної траса. ***Ділянка № 3 –*** розташована на території національно НПП «Північне Поділля».

На ділянці № 1 дорослі особини *Pinus sylvestris* L. пошкодженні через погодні умови (сильні вітри, велику кількість снігу взимку). Також неозброєним оком помітно, що у більшості молодих генеративних дерев *P. sylvestris* спостерігалося пожовтіння голок та всихання на гілках, що могло бути спричинене через сільськогосподарські роботи або забруднене повітря. На досліджуваній ділянці також зростають ювеніальні особини *Populus tremula* L. у яких спостерігалися некрози листяної пластини (рис. 1).

За результатами проведеної оцінка ступення порушеня екосистеми ділянки №1 нами встановлео, що тут домінує *P. sylvestris*, також присутня *Betula pendula* Roth., яка є наймолодшим та найменшим об'єктом у вибірці (табл.1.).

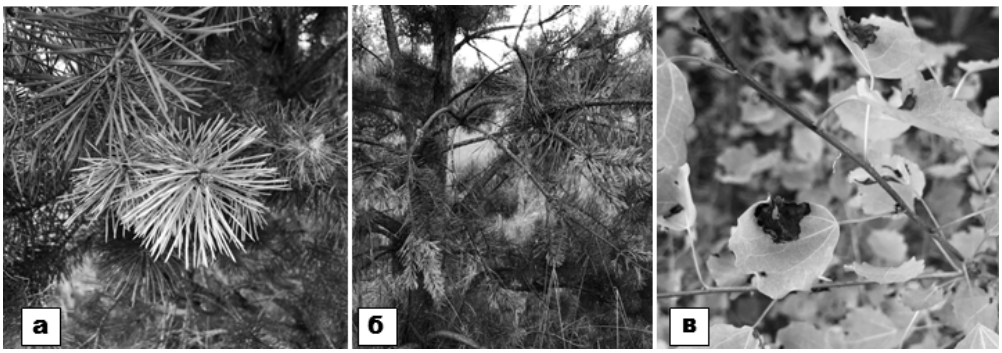


Рис. 1. а – пожовтіння голок, б – сухе і пошкоджене гілля P. sylvestris, в – некрози у P. tremula

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

Таблиця 1

Результати оцінки екосистеми ділянки №1 на ступінь порушення

Вид / Критерії оцінювання	*P. sylvestris*	*P. sylvestris*	*P. sylvestris*	*B. pendula*	*P. sylvestris*	Середні показники
Діаметр стовбура, см	6,3	6,3	10	4	2,1	5,7
Висота дерева, м	3	5	6	2	3	3,8
Клас стійкості	II	II	II	I	II	II
Естетична оцінка	2	2	2	1	2	2
Вік рослини	2	2	2	1	1	2
Морфологічна оцінка	конічна форма	конічна форма	конічна форма	неправильно-яйцеподібна або обернено-яйцепо-дібна	конічна форма	-
Щільність крони	2	2	2	2	2	2
Біоекологічна оцінка	2	2	2	1	2	2
Декоративна оцінка	5	4	5	3	4	4

Як видно із табл. 1, досліджувана ділянка має середній ступінь порушення екосистеми (2 бали) та переважання II класу стійкості. Насадження перебувають у задовільному стані, проте домінуючий вид (*P. sylvestris*) відчуває певний антропогенний або природний тиск, що не дозволяє їм досягти максимальних показників стійкості (I класу). Загалом, екосистему ділянки № 1 можна охарактеризувати як слабо порушену.

Під час моніторингу ділянки № 2 було ідентифіковано 50 екземплярів P. sylvestris, переважну більшість яких (35 одиниць) становлять особини ювеніального вікового стану. Крім того, зафіксовано поодинокі ювенільні рослини P. tremula з ознаками некрозу та ураження листкових пластинок. У сосни звичайної спостерігаються патологічні зміни: хлороз, а також всихання пагонів і гілок (рис. 2).

Нами встановлено, що на ділянці спостерігається значна різнорівневість. Середній діаметр стовбура становить 6,6 см, а середня висота дерев – 3,4 м. Найбільш розвиненим є дерево № 1 (висота 10 м), тоді як інші дерева значно менші (1,3–2,5 м), що свідчить про нерівномірний віковий склад або затримку росту молодняка (табл. 2).

З наведених даних (табл. 2) було встановлено, що усі дерева на досліджуваній ділянці мають II клас стійкості, це засвідчує те, що екосистема перебуває у задовільному, але пригніченому стані. Рослини здорові, але зазнають постійного негативного впливу (можливо, через ущільнення ґрунту або недостатнє освітлення). Результати біоекологічної оцінки засвідчують гомогенність екологічних умов об'єктів дослідження,

Досліджуючи ділянку № 3 нами були виявлені повалені сухі, старі дерева та мертва деревина. Тут зростають хвойні та листяні дерева, серед яких: *Larix decidua* L., *Acer platanoides* L., *Carpinus betulus* L. Виявлено, що стовбури окремих модрин вигнутої форми, це є ознакою боротьби за освітленість, адже ліс є досить густий, без просік.

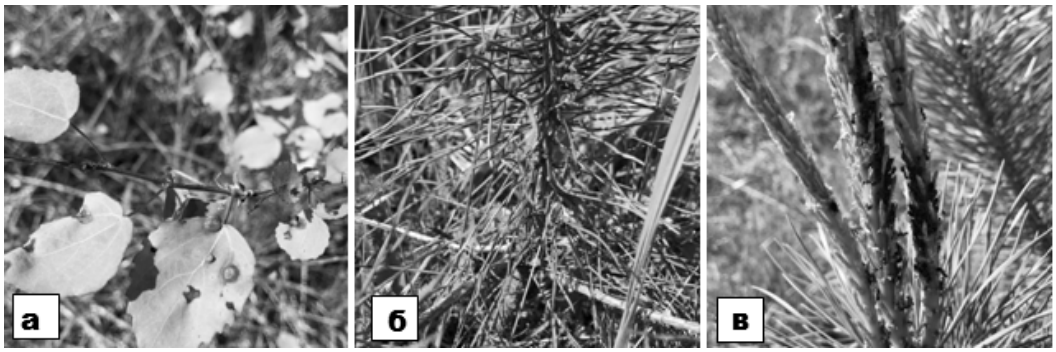


Рис. 2. а – захворювання листкової пластини у P. tremula, б – всихання хвої, в – шкідники P. sylvestris

Таблиця 2

Результати оцінки екосистеми ділянки № 2 на ступінь порушення

Вид / Критерії оцінювання	*P. sylvestris*	*P. sylvestris*	*P. sylvestris*	*P. tremula*	*P. sylvestris*	Середні показники
Діаметр стовбура, см	14,3	7	3,8	3	5	6,6
Висота дерева, м	10	2,5	1,4	1,3	1,8	3,4
Клас стійкості	II	II	II	II	II	II
Естетична оцінка	2	1	1	1	1	1
Вік рослини	2	2	1	1	2	2
Морфологічна оцінка	конічна форма	конічна форма	конічна форма	овальна	конічна форма	-
Щільність крони	2	2	2	3	2	2
Біоекологічна оцінка	2	2	2	2	2	2
Декоративна оцінка	3	2	3	3	3	3

За результатами дослідження нами встановлено, що на ділянці № 3 спостерігається високий рівень стійкості деревних видів та мінімальне порушення екосистеми. Такі показники вказують на те, що насадження є біологічно здоровими, функціональними та естетично привабливими (табл. 3).

Отримані дані (табл. 3) засвідчують, що для дерев досліджуваної ділянки встановлено І клас стійкості, що вказує на здорові дерева, які не мають ознак пригнічення, хвороб та значних механічних пошкоджень.

Загалом біоекологічна оцінка свідчить про оптимальні умови зростання видів. Рослини повністю відповідають своєму екологічному ареалу, мають здоровий вигляд та нормальний приріст. Наявність різних форм крон вказує на складну просторову структуру ділянки, що характерно для стійких паркових або лісових біоценозів.

Значний діаметр стовбурів (до 63,6 см у модрини) та висота (до 22 м) свідчать про те, що на ділянці переважають зрілі, сформовані екземпляри, які виконують важливу екологічну роль.

За результатами аналізу середніх показників ділянок на ступінь порушення екосистеми нами було встановлено, що на ділянці № 3 зростають дерева з найбільшим діаметра стовбура – 42,5 см. Найтонші стовбури дерев відміченні на ділянці № 1 – 5,7 см. Найвищі дерева, ростуть на ділянці № 3 (16,8 м), найнижчі – на ділянці № 2 (3,4 м).

В результаті визначення класу стійкості, було встановлено, що другий клас стійкості (II) характерний для ділянок № 1-2 (рис. 3). Це означає, що дерева на цих ділянках мають уповільнений приріст по висоті, з одиничними сухими сучками в кроні і незначними (на 10–15 см) зовнішніми пошкодженнями стовбура, без виникнення гнилей. Для ділянки № 3 властивий – перший клас стійкості (I), рослини абсолютно здорові, з ознаками гарного росту і розвитку.

Таблиця 3

Результати оцінки екосистеми ділянки № 2 на ступінь порушення

Вид / Критерії оцінювання	*C. betulus*	*A. platanoides*	*L. decidua*	*L. decidua*	*L. decidua*	Середні показники
Діаметр стовбура, см	35,9	20	63,6	62	30,8	42,5
Висота дерева, м	17	10	22	20	15	16,8
Клас стійкості	I	I	I	I	I	I
Естетична оцінка	1	1	1	1	1	1
Вік рослини	2	2	2	2	2	2
Морфологічна оцінка	циліндрично-округла	куляста	широко-колоно-видна	широко-колоно-видна	широко-колоно-видна	-
Щільність крони	1	1	1	1	1	1
Біоекологічна оцінка	1	1	1	1	1	1
Декоративна оцінка	1	1	2	2	1	1

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

Аналіз естетичних показників свідчить, що насадження ділянки №1 характеризуються середнім рівнем декоративності. Водночас рослинність на ділянках № 2 та № 3 відзначається високими декоративними властивостями й перебуває у належному фітосанітарному стані, що виключає необхідність проведення санітарних заходів (рис. 3).

Візуальна оцінка встановила середню щільність (25-50%, 2 бали) для ділянок № 1-2. Для ділянки № 3 характерна висока зімкнутість крон із просвітами до 25%, що становить 1 бал.

За результатами комплексної біоекологічної оцінки, стан дерев на ділянках № 1-2 визначено як задовільний (2 бали). Водночас насадження на

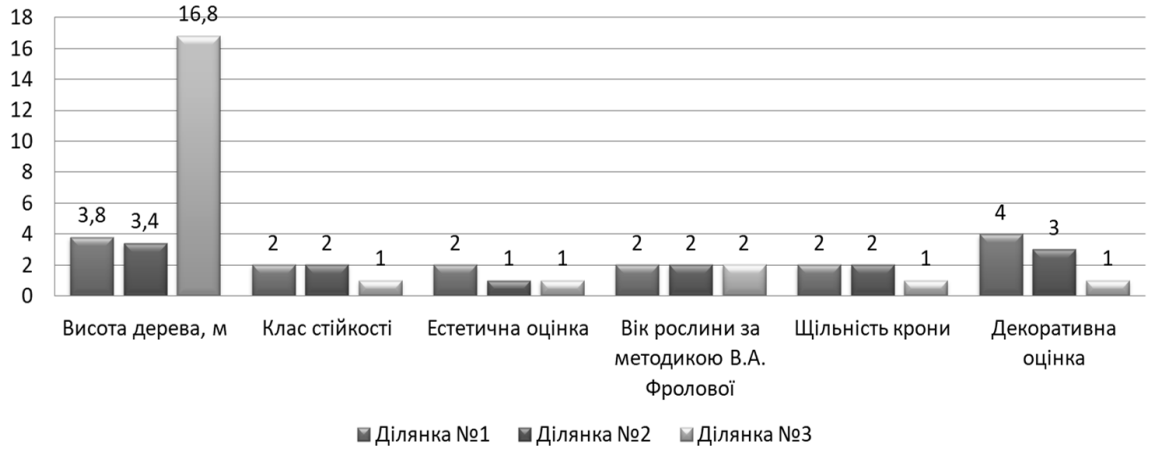


Рис. 3. Середні показники досліджуваних ділянок

ділянці № 3 демонструють кращі показники й оцінюються як «добрі», що відповідає максимальному 1 балу.

Під час обстеження зазначених територій ознак не було виявлено лісових пожеж, пошкоджень ентомошкідниками або фактів незаконних рубок. Загальний стан насаджень переважно задовільний. На ділянці № 1 зафіксовано окремі дерева, пошкоджені внаслідок несприятливих метеорологічних умов (буреломи навесні 2024 року). На ділянці № 2 виявлено осередки мурахи чорної на особинах P. sylvestris.

Виражений антропогенний вплив зафіксовано на ділянці № 2, де ювенільні особини сосни звичайної (P. sylvestris) зазнали пошкоджень внаслідок викидів вихлопних газів від прилеглої автотраси. Деструктивні зміни проявилися у вигляді хлорозів, а також усихання хвої та нижніх частин гілок. Водночас у незначної кількості молодих особин тополі тремтячої (P. tremula) спостерігалися некротичні утворення – почорнілі плями на листкових пластинках

Висновки. Проведене дослідження біометричних параметрів деревних насаджень у Львівській області виявило пряму залежність між рівнем антропогенного навантаження та темпами росту дерев. За сукупністю ознак (зімкнутість крон, декоративність, стійкість) стан дерев на ділянках № 1–2 визначено як «задовільний» (2 бали), тоді як ділянка № 3 демонструє оптимальні життєві показники й оцінюється як «добра» (1 бал). Це підтверджує нерівномірність екологічного стану лісопаркових чи лісових зон регіону залежно від їхньої локалізації.

Основними деструктивними чинниками для досліджених територій є: наслідки екстремальних метеорологічних явищ (буреломи 2024 року); осередки шкідників (мураха чорна), що вражають сосну звичайну; інтенсивний вплив автотранспорту, що спричиняє забруднення екосистеми вихлопними газами. Останнє проявляється через морфологічні патології (хлорози, некрози листя *P. tremula*, усихання хвої *P. sylvestris*), що є критичним маркером порушення екосистеми в зонах прилеглих до автомагістралей.

Результати оцінки свідчать про необхідність впровадження заходів з мінімізації техногенного впливу на ділянках поблизу транспортних шляхів та проведення вибіркових санітарних рубок на територіях, пошкоджених внаслідок несприятливих погодних умов, для збереження загальної стійкості екосистеми Львівщини.

Подальші дослідження будуть сфокусовані на обґрунтуванні кількісних показників техногенного впливу, що дозволить глибше розкрити механізми деградації рослин під дією антропогенних чинників. Результати нових розвідок можуть стати науковою основою для прийняття управлінських рішень у сфері екологічного менеджменту та розробки програм відновлення порушених ландшафтів Львівщини.

Література

1. Hnativ P. S. Functional diagnostics in dendroecology. Lviv : Kamula, 2014. 336 p.
2. Stelmakhova T. F. Creating sustainable green spaces in conditions of atmospheric pollution and high recreational load. *Forestry and agroforestry : Sat. Sciences*. Kharkiv : Ukrniilkha, 2000. Issue 112. P. 232–237.
3. Wyche K.P., Ryan A.C., Hewitt C.N. et al. Emissions of biogenic volatile organic compounds and subsequent photochemical production of secondary organic aerosol in mesocosm studies of temperate and tropical plant species. *Atmos. Chem. Phys*. 2014. № 14. P. 12781–12801.
4. Клименко М.О., Прищепа А.М., Вознюк Н.М. Моніторинг довкілля. Київ : Академія, 2006. 360 с.
5. Пацева І.Г., Корбут М.Б., Алпатова О.М., Пацев І.С. Аналіз стійкості деревних порід рослин у міських умовах. *Екологічні науки*. 2024. № 1(52), Т. 2. С. 76–78. DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.1-52.2.14. (дата звернення 10.01.2024).
6. Поліщук С.Ф., Серебряков В.В. Фітоіндикація антропогенних впливів за морфологічними змінами рослин. *Еколого-збалансований розвиток суспільства: стан, проблеми, перспективи : зб. ст. викладачів, вчителів, студентів та здобувачів наук. ступеня «доктор філософії»* / за ред.: О.В. Мудрак. Вінниця : КЗВО «Вінницька академія безперервної освіти», 2024. Вип. 5. С. 38–43.
7. Вітенко В.А., Баюра О.М., Козаченко І.В. Методика комплексного оцінювання стану деревних рослин на прикладі декоративних форм *Morus alba* L. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2019. Т. 29, № 7. С. 13–15. DOI https://doi.org/10.15421/40290702

Дата першого надходження статті до видання: 29.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 502/504:556
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.15

ВИКОРИСТАННЯ ІНДИКАТОРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФІТОПЛАНКТОНУ ПРИ ОЦІНЮВАННІ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ЕКОСИСТЕМИ

Суходольська І.Л.
Рівненський державний гуманітарний університет
вул. Ст. Бандери, 12, 33028, м. Рівне
iryna.sukhodolska@rshu.edu.ua

У статті наведено результати досліджень показників фітопланктону оз. Задовже впродовж червня–жовтня 2024 р. Фітопланктон озера налічує 53 види водоростей, які представлені 55 внутрішньовидовими таксонами. Ідентифіковані види належать до 48 родів, 31 родини, 24 порядків, 13 класів та 8 відділів. Флористичний спектр планктонних водоростей сформовано відділами *Chlorophyta* > *Bacillariophyta* > *Cyanobacteria* > *Charophyta* > *Ochrophyta* = *Euglenozoa* > *Miozoa* = *Cryptophyta*. Показано, що в домінуючий комплекс за біомасою входять види відділів *Miozoa* та *Bacillariophyta*, а за чисельністю – *Cyanobacteria, Ochrophyta, Chlorophyta, Bacillariophyta* та *Miozoa*. Для озера характерна переважно полідомінантна структура фітопланктону. Встановлено, що більшість родів представлено по одному виду, лише окремі по два (*Desmodesmus* (Chodat) S.S.An, T.Friedl & E.Hegewald, *Lepocinclis* Perty*, Staurastrum* Meyen ex Ralfs*, Navicula* Bory*, Fragilaria* Lyngbye) та три (*Cosmarium* Raciborski). Зафіксовано високі показники розвитку *Tabellaria fenestrata* (Lyngbye) Kützing, що свідчить про низьке органічне забруднення та високу якість води.

Флористичне ядро альгофлори оз. Задовже впродовж червня–жовтня 2024 р. формують переважно планктонні та планктонно-бентосні види, індиференти щодо відношення до насичення води киснем та реофільності, pH середовища і галобності. Більшість видів приурочені до помірного діапазону температури. За рівнем трофності найбільш виражені мезотрофні та мезоевтрофні види. Показано, що за типом живлення та відношенням до кількості нітрогенвмісних органічних сполук представлені тільки види автотрофи. Переважають індикатори чистої води – сапроксени. За органічним забрудненням води за системою Пантле-Бук (в модифікації Сладечека) найбільш численна група бета-мезосапробіонтів та оліго-альфа-мезосапробіонтів. За індикаторними особливостями видів фітопланктону вода оз. Задовже варіює від II до III класу якості (чиста та помірно забруднена), що свідчить про добрий екологічний стан екосистеми. *Ключові слова:* видове багатство, домінанти, індикатори, озеро, якість води, екологічний стан, фітопланктон, зона сапробності

The use of phytoplankton indicator characteristics in assessing the ecological status of an ecosystem. Sukhodolska I.

This article presents the results of phytoplankton studies conducted in Lake Zadovzhe from June to October 2024. The lake's phytoplankton community comprises 53 algal species represented by 55 intraspecific taxa. The identified species belong to 48 genera, 31 families, 24 orders, 13 classes, and 8 phyla. The floristic spectrum of planktonic algae was formed by the divisions *Chlorophyta* > *Bacillariophyta* > *Cyanobacteria* > *Charophyta* > *Ochrophyta* = *Euglenozoa* > *Miozoa* = *Cryptophyta.* The dominant biomass was contributed mainly by *Miozoa* and *Bacillariophyta*, while the highest abundance was observed in *Cyanobacteria*, *Ochrophyta, Chlorophyta, Bacillariophyta,* and *Miozoa*. The phytoplankton structure of the lake is predominantly polydominant. Most genera are represented by a single species, with only a few comprising two (*Desmodesmus* (Chodat) S.S.An, T.Friedl & E.Hegewald, *Lepocinclis* Perty*, Staurastrum* Meyen ex Ralfs*, Navicula* Bory*, Fragilaria* Lyngbye) or three (*Cosmarium* Raciborski) species. A high abundance of *Tabellaria fenestrata* (Lyngbye) Kützing was recorded, indicating low organic pollution and high water quality. The floristic core of Lake Zadovzhe's algal flora during the study period consisted mainly of planktonic and plankton–benthic species, indifferent to oxygen saturation, rheophilicity, pH, and salinity. Most species were associated with a moderate temperature range. In terms of trophic status, mesotrophic and mesoeutrophic species were most prominent. Only autotrophic species were recorded, with no facultative or obligate heterotrophs present. Indicators of clean water (saproxenes) predominated. According to the Pantle–Buk system (modified by Sládeček), the majority of species were beta-mesosaprobionts and oligo–alpha-mesosaprobionts. Based on the indicator characteristics of phytoplankton species, the water quality of Lake Zadovzhe ranged between Class II and Class III (clean to moderately polluted), reflecting a good ecological status of the ecosystem. *Key words:* species richness, dominants, indicators, lake, water quality, ecological status, phytoplankton, saprobity zone

Постановка проблеми. На дію стресових умов у водних екосистемах найпершою реагує автотрофна ланка – фітопланктон. Відгук проявляється перебудовою структури фітопланктону, що показує масштаби змін з урахуванням кліматичних особливостей [5, 7, 11]. Індивідуальна чутливість видів фітопланктону до якості води забезпечує постійне їхнє використання як біоіндикаторів, особливо у ранній діагностиці здоров'я водної екосистеми.

Актуальність дослідження. Значне поширення планктонних водоростей у водному середовищі надає цінну інформацію про стан екосистем. Як індикаторні характеристики найчастіше використовують реакцію на температурні умови, pH, насиче-

© Суходольська І.Л., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

ність води киснем, солоність, органічне забруднення, трофність, наявність чи відсутність груп водоростей, співвідношення відділів, індекси різноманітності та сапробності, частоту зустрічності тощо [7, 12, 13]. Специфічність видового багатства, домінування видів за чисельністю та біомасою фітопланктону дозволяє розрахувати рівень органічного і нітрогенвмістного забруднення, а також визначити екологічний стан та рівень здатності водної екосистеми до самоочищення.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та науково-практичними завданнями. Миттєва реакція фітопланктону на несприятливі впливи надає суттєві переваги його використання як індикатора, особливо у порівнянні з іншими гідробіонтами. Зміна автотрофної ланки дозволяє прослідковувати перебудови нижчих трофічних рівнів та визначити толерантність видів до забруднення. Крім того, живучість гідробіоценозів показує спроможність екосистеми здійснювати трансформацію, міграцію та накопичення речовин, залучених у кругообіг і відповідно свідчить про рівень підтримки її стабільного стану.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Виокремлення видів фітопланктону як надійних індикаторів стану середовища дозволяє за їхнім станом, розвитком та особливостями структурно-функціональних показників найбільш точно прослідковувати не лише кліматичні зміни, але і стійкість та вразливість водної екосистеми. Науковці використовують різні критерії для проведення діагностики екосистеми за фітопланктоном [4, 6, 7, 11–13]. Наприклад, у роботі авторів [3] виокремлено найбільш інформативні параметри водоростевих угруповань та запропоновано числові характеристики (видове різноманіття (за вегетаційний сезон, середнє у пробах), надвидове різноманіття (кількість родів), інформаційне різноманіття, коефіцієнт варіації чисельності та біомаси, частка *Cyanophyta* у біомасі, χ-, о-сапробів, α-, ρ-сапробів та індекс сапробності). Застосування представлених значень характеризує насамперед екологічний стан водойм за класами якості води. Ефективність використання фітопланктону як об'єктивного індикатору стану водойми добре обґрунтована у численних працях [3, 4, 6, 7, 11, 12]. Автори переважно акцентують увагу на здатності фітопланктону реагувати на антропогенний вплив та можливостях реєструвати порушення у водному середовищі [10, 12, 13]. Також окремі праці присвячені використанню моделей для розрахунку впливу та попередженню негативних наслідків [8]. Основна складність складання прогнозів, особливо довгострокових, полягає у відсутності систематичних спостережень водних екосистем щодо розвитку видового багатства та інших показників фітопланктону. Відповідно ідентифікація фітопланктону оз. Задовже дозволить зрозуміти закономірності формування флори водоростей, прослідкувати зміни якості води за видами-індикаторами та оцінити екологічний стан водної екосистеми.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Підходи до оцінки стану водних екосистем наведених в літературних джерелах базуються на вимірюванні порушень самоочисної спроможності, погіршення якості води, втрати біорізноманіття тощо. Для вирішення означених завдань використовують моніторингові спостереження, які дозволяють прослідкувати та прогнозувати негативні впливи. Однак перелік показників включених до програм часто обмежується кількома репрезентативними і не завжди відображає реальний стан водного об'єкту. Згідно Програми державного моніторингу вод окрім хімічних, фізико-хімічних та гідроморфологічних показників включені біологічні (фітопланктон, мікрофітобентос (діатомові), макрофіти, донні макробезхребетні та риби) [1]. Проте в представленому переліку на 2026 р. для багатьох об'єктів, в тому числі і озер (близько 16), вивчення фітопланктону не виконується або проводиться в окремі місяці для чітко визначених водних екосистем. Звісно оз. Задовже не входить в перелік об'єктів моніторингових спостережень, тому важливо продовжувати вивчення складу фітопланктону оз. Задовже для екологічної оцінки водної екосистеми, а в подальшому і створення прогнозів щодо ймовірних змін.

Новизна. Встановлено особливості розвитку (видове багатство, домінуючий комплекс, види-індикатори) фітопланктону оз. Задовже впродовж 2024 р., оцінено якість води та екологічний стан водної екосистеми.

Методологічне або загальнонаукове значення. Дослідження фітопланктону оз. Задовже дозволяє доповнити список ідентифікованих видів, визначити екологічний стан екосистеми та оцінити її стійкість чи вразливість.

Викладення основного матеріалу. Озеро Задовже знаходиться в межах Нобельського національного природного парку (Рівненська обл.). Глибина озера на окремих ділянках досягає 19 м. Площа водного дзеркала складає 0,60 км^2. Озеро має карстове походження.

Проби води для визначення фітопланктону відбирали впродовж червня–жовтня 2024 р. з глибини 0,2–0,3 м. Після наповнення водою пластикових ємностей об'ємом 0,5 дм^3 проводили консервування з використанням формаліну. Після відстоювання проби концентрували до об'єму 0,05–0,1 дм^3. Камеральну обробку проб здійснювали з використанням світлового мікроскопу «Laboval» (Karl Zeiss, (Germany)). Клітини рахували в трьох повторностях за допомогою камери Нажотта (об'ємо 0,02 см^3). Біомасу визначали розрахунково-об'ємним методом [2]. Таксономічна номенклатура водоростей представлена згідно міжнародного електронного каталогу *AlgaeBase* [9]. Індикаторні характеристики

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

планктонних водоростей наведені відповідно до літературних джерел [7, 12].

Впродовж червня–жовтня 2024 р. у складі фітопланктону оз. Задовже. ідентифіковано 53 види водоростей, представлених 55 внутрішньовидовими таксонами із номенклатурним типом виду включно (ввт.), що належать до 48 родів, 31 родини, 24 порядків, 13 класів та 8 відділів (рис. 1).

За чисельністю домінують види *Cyanobacteria*, *Ochrophyta*, *Chlorophyta, Bacillariophyta* та *Miozoa*, а за біомасою – *Miozoa* та *Bacillariophyta.*

Найбільша кількість видів у липні представлена відділом *Chlorophyta*, а у жовтні *Bacillariophyta* (по 23). Варто зауважити, що у червні видів відділу *Cyanobacteria* не було виявлено. Найбільшою кількістю видів представлений рід *Cosmarium* Raciborski (3 види) та *Desmodesmus* (Chodat) S.S.An, T.Friedl & E.Hegewald, *Lepocinclis* Perty*, Staurastrum* Meyen ex Ralfs*, Navicula* Bory*, Fragilaria* Lyngbye (по 2).

Для оцінювання екологічного стану та якості води оз. Задовже види фітопланктону наведено за порядком зростання їхнього індикаторного значення, що на рисунках зазначено стрілками (рис. 2).

Індикатори місцезростань представлені 41 видом водоростей (74,5% від загального видового багатства). Найбільший відсоток становлять планктонні (34%). На другому місці планктонно-бентосні (29%), а на третьому – планктонно-бентосні, епіфітні (17%). Бентосні налічують лише 6 видів (15%), планктонно-бентосні, ґрунтові – 1 (2%), а ґрунтові – 1 (2%) (рис. 2 A).

Серед індикаторів реофільності і насичення води киснем виявлено 30 видів (54,5% від загального видового багатства). 87% складають види, які є індикаторами повільнотекучих вод з середнім рівнем кисню. 10% видів-індикаторів належать до стоячих вод з низьким рівнем кисню, а 3% до швидкотекучих вод (рис. 2 B).

Індикатори галобності налічують 36 видів (65,5% від загального видового багатства). Серед них переважають прісноводні види індиференти (86%). Відсоток галофілів становить 8, а галофобів та мезогалобів по 1 виду (по 3%) (рис. 2 C). 23 види (41,8% від загального видового багатства) водоростей проявляють виражену чутливість до активної реакції середовища. Індиференти складають 64%, алкаліфіли – 17%, ацидофіли – 13%, а алкалібіонти – 4% (рис. 2 D). Видів, що реагують на зміну температурного режиму виявлено лише 9 (16,4% від загального видового багатства). З них 56% належать до помірного діапазону температур. 44% характеризуються високою екологічною пластичністю (валентністю) до температурних умов (рис. 2 E).

9 видів (16,4% від загального видового багатства) віднесено до індикаторів типу живлення та відношення до кількості нітрогенвмісних органічних сполук (НОС). 56% видів належать до автотрофів, що витримують підвищені концентрації НОС. 44% – це види автотрофи, що розвиваються за низьких концентрацій НОС. Варто зауважити, що облігатних та факультативних гетеротрофів не виявлено (рис. 2 F).

Найбільший відсоток (62) серед видів органічного забруднення води становлять сапроксени. Присутність індикаторів чистої води свідчить про добру її якість. Група еврисапроби (помірно забруднені води) налічує 38% (рис. 2 G).

Індикатори трофності представлені 19 видами (34,5% від загального видового багатства). З них найбільша кількість видів індикаторів мезотрофних (37%) та мезоевтрофних умов (32%). На другому місці олігомезотрофні (21%), а на третьому – евтрофні та широкої амплітуди трофності (по 5%).

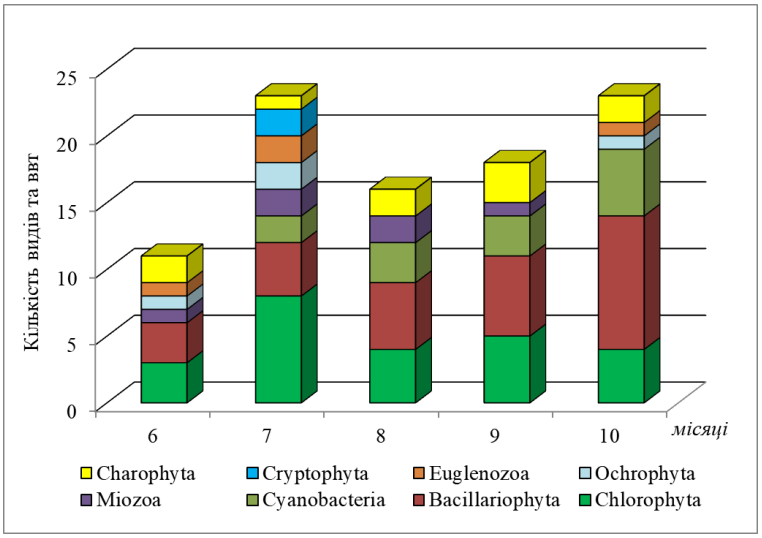
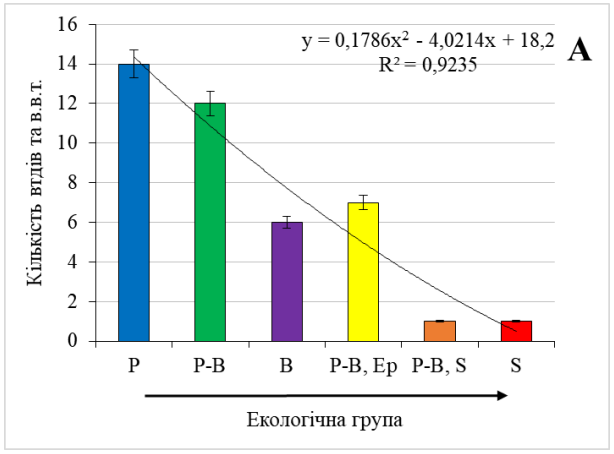
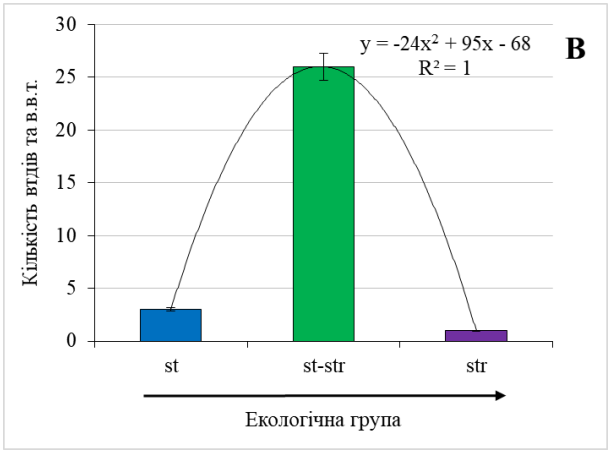
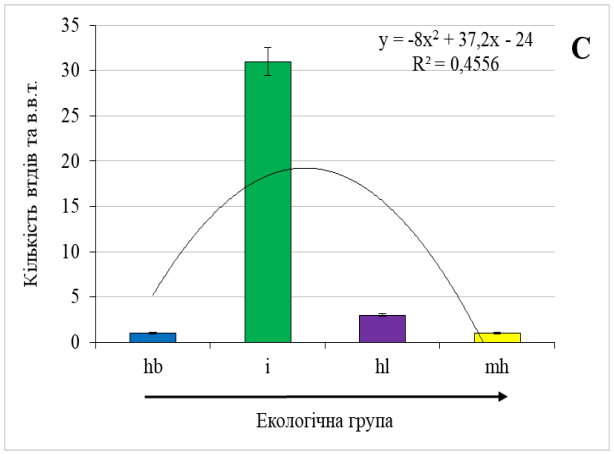
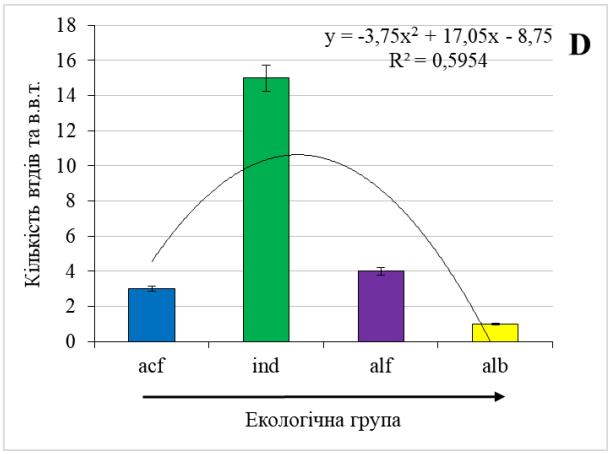


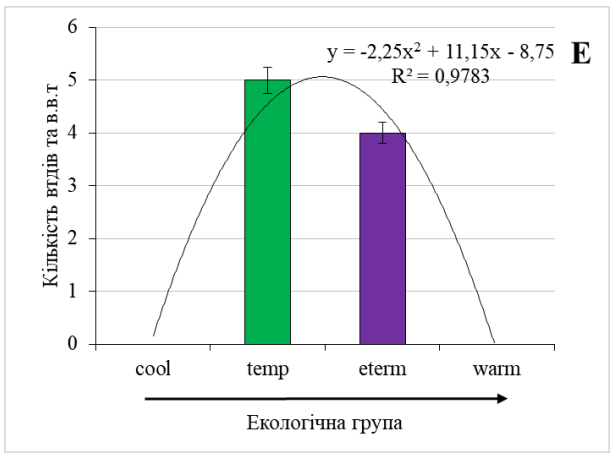
Рис. 1. Зміна видового багатства фітопланктону оз. Задовже (червень–жовтень, 2024 р.)

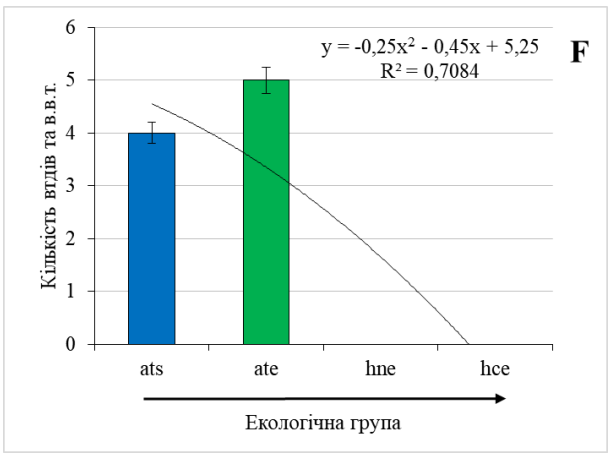


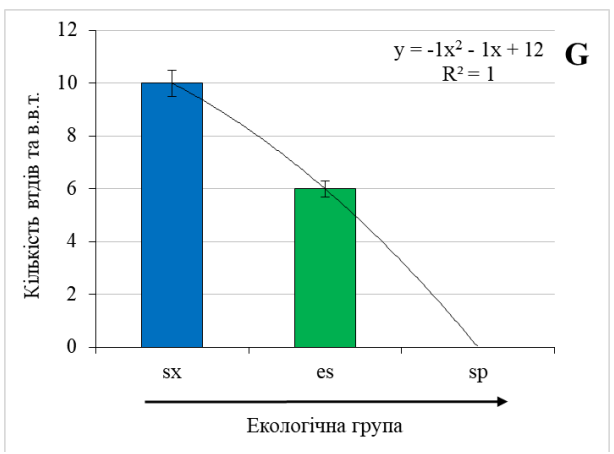


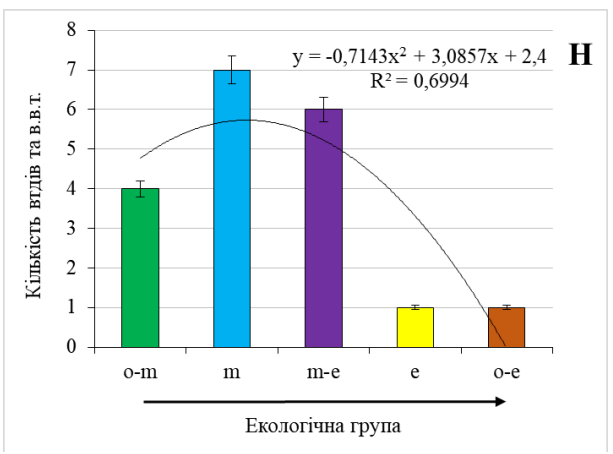












ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

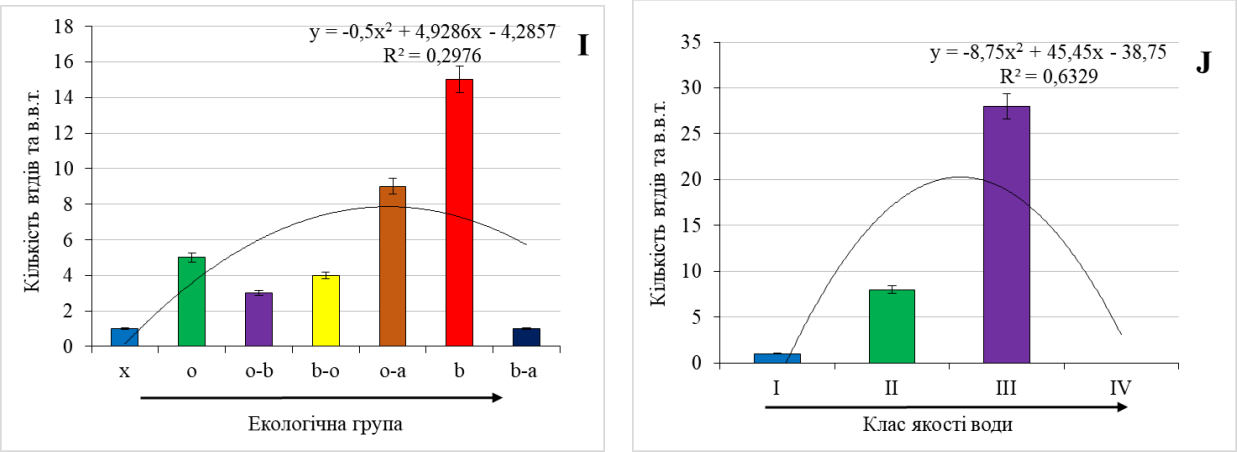


Рис. 2. Розподіл видів та ввт. водоростей, що є індикаторами: *A – місцезростань (B – бентосні; P-B – планктонно-бентосні; P – планктонні; Ep – епіфітні; S – ґрунтові); B –насиченості води киснем та реофільності (st – стоячі; str – швидкотекучі; st-str – повільнотекучі та/або індиференти; ae – аерофільні); C – галобності (hb – галофоби; i – індиференти; hl – галофіли; mh – мезогалоби; oh – олігогалоби); D – pH середовища (acf – ацидофіли; ind – індиференти; alf – алкаліфіли; alb – алкалібіонти); E – температурних умов (cool – холодолюбні; temp – помірного діапазону та/або індиференти; eterm – евритермні; warm – теплолюбні); F – типу живлення та відношення до кількості нітрогенвмісних органічних сполук (HOC): (ats – автотрофи, що розвиваються за низької концентрації HOC; ate – автотрофи, що витримують підвищені концентрації HOC); G – органічного забруднення вод (за системою Ватанабе): sx – сапроксени (чисті води); es – еврисапроби (помірно забруднені води); sp – сапрофіли (забруднені води); H – рівня трофності (ot – оліго-мезотрофні; m – мезотрофні; me – мезо-евтрофні; e – евтрофні; o-e – широкої амплітуди трофності); I – органічного забруднення (за системою Пантле-Бук у модифікації Сладечека): x – ксеносапробіонти; o – олігосапробіонти; o-b – оліго-бета-мезосапробіонти; b-o – бета-олігосапробіонти; o-a – оліго-альфа-мезосапробіонти; b – бета-мезосапробіонти; b-a – бета-альфа-мезосапробіонти); J – класи якості води; R^2 – величина достовірності апроксимації.*

Евтрофний вид *Dolichospermum spiroides* (Klebahn) Wacklin, L.Hoffmann & Komárek досягає найвищої чисельності у вересні. Чисельність *D. spiroides* складає 70 тис. кл/дм^3 (31,5% від загальної чисельності), що свідчить про погіршення якості води. *Navicula cryptocephala* Kützing відома як вид широкої амплітуди трофності. Проте для *N. cryptocephala* впродовж дослідження встановлено низькі показники чисельності та біомаси (рис. 2 H).

38 видів (69,0% від загального видового багатства) належать до індикаторів сапробності за системою Пантле-Бук у модифікації Сладечека. Найбільш виражена група бета-мезосапробіонти (39%). На другому місці оліго-альфа-мезосапробіонти (24%), а на третьому – олігосапробіонти (13%). Також виявлені індикатори бета-олігосапробної (11%) та оліго-бета-мезосапробної (8%) зон. Крім того, одним видом (*Lepocinclis tripteris* (Dujardin) B.Marin & M.Melkonian) представлена бета-альфа-мезосапробна зона (помірне забруднення органічними речовинами) (рис. 2 I). Також варто зауважити, що вид *L. tripteris* субдомінує за біомасою (0,0252 мг/дм^3) лише у липні. До видів ксеносапробіонтів належить *Tabellaria fenestrata* (Lyngbye) Kützing. Біомаса (24,9–56,1%) та чисельність (13,3–18,9%) *T. fenestrata* суттєво зростає впродовж вересня та жовтня. Високі показники розвитку *T. fenestrata* свідчать про дуже низьке органічне забруднення, оскільки вид слугує індикатором найвищої якості води.

Виявлені види-індикатори розподілені відповідно до трьох класів якості води. Індикатори I класу якості представлені 1 (2,7%) видом, II класу – 8 (21,6%), а III класу – 28 (75,7%). Більш виражена група індикаторів III класу, проте, присутність видів II класу свідчить про зміну якості води від чистої до помірно забрудненої.

Головні висновки. Фітопланктон оз. Задовже впродовж 2024 р. представлений 8 відділами (*Chlorophyta* > *Bacillariophyta* > *Cyanobacteria* > *Charophyta* > *Ochrophyta* = *Euglenozoa* > *Miozoa* = *Cryptophyta*), 13 класами, 24 порядками, 31 родиною та 48 родами. Найбільшою кількістю видів характеризується рід *Cosmarium* (3 види). Домінуючий комплекс фітопланктону за чисельністю сформований видами відділів *Cyanobacteria*, *Ochrophyta*, *Chlorophyta, Bacillariophyta* та *Miozoa*, а за біомасою – *Miozoa* та *Bacillariophyta.*

Флористичний список альгофлори оз. Задовже у 2024 р. переважно складають планктонні та планктонно-бентосні види, індиференти за відношенням до насичення води киснем та реофільності, галобності, pH середовища та помірного діапазону температури води. За типом живлення та відношенням до кількості нітрогенвмісних органічних сполук пред-

ставлені лише види автотрофи (56% та 44% – індикатори підвищеної та низької концентрації НОС). Найбільш виражений за рівнем трофності розвиток мезотрофних та мезоевтрофних видів. У фітопланктоні озера переважають індикатори чистої води – сапроксени. Серед видів-індикаторів органічного забруднення вод за системою Пантле-Бук (в модифікації Сладечека) найбільша частка бета-мезосапробіонтів та оліго-альфа-мезосапробіонтів. За видами індикаторами вода оз. Задовже змінюється від II (чиста) до III класу якості (помірно забруднена), що свідчить про високий рівень стійкості екосистеми та добрий екологічний стан.

Перспективи використання результатів дослідження. Виявлені види фітопланктону слугують доповненням списків водоростей озер України. Також отримані результати можуть бути використані для прогнозування стану водних екосистем за розвитком фітопланктону та попередження змін якості води.

Література

1. Наказ Міністерства економіки, довкілля та сільського господарства України від 27.01.2026 № 1250 «Про затвердження Програми державного моніторингу вод». URL: https://surl.lt/ipvbrv (дата звернення: 15.04.2026).
2. Щербак В.І. Методи досліджень фітопланктону. У кн.: *Методичні основи гідробіологічних досліджень водних екосистем.* Київ, 2002. С. 41–48.
3. Щербак В.І., Семенюк Н.Є., Майстрова Н.В. Адаптація методів оцінки екологічного стану водойм мегаполісів України за фітопланктоном і фітомікроперифітоном відповідно до Водної Рамкової Директиви 2000/60/ЄС. *Доповіді Національної академії наук України.* 2009. №10. С. 206–211.
4. Bach L.T., Lohbeck K.T., Reusch T.B., Riebesell U. Rapid evolution of highly variable competitive abilities in a key phytoplankton species. *Nature Ecology & Evolution.* 2018. Vol. 2(4). P. 611–613. URL: https://doi.org/10.1038/s41559-018-0474-x
5. Barinova S. On the classification of water quality from an ecological point of view. *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*. 2017. Vol. 2(2). P. 1–8. URL: https://doi.org/10.19080/IJESNR.2017.02.555581
6. Barinova S., Krupa E., Khitrova Y. Phytoplankton Diversity and Bioindication of the Lakes in the Burabay National Natural Park Northern Kazakhstan. *Ecologies*. 2023. Vol. 4. P. 242–268. URL: https://doi.org/10.3390/ ecologies4020017
7. Barinova S.S., Bilous O.P., Tsarenko P.M. *Algal indication of water bodies in Ukraine: methods and perspectives.* Haifa, Kiev: University of Haifa Publisher, 2019. 367 p.
8. Beckmann A., Schaum C.E., Hense I. Phytoplankton adaptation in ecosystem models. *Journal of theoretical biology.* 2019. Vol. 468. P. 60–71. URL: https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2019.01.041
9. Guiry M.D., Guiry G.M. *Algae Base.* World-wide electron. publ. Nat. Univ. Ireland, Galway. 2024. URL: https://www.algaebase.org (дата звернення: 10.12.2024).
10. Hanžek N., Šiljeg M., Šiki´c T., Stankovi´c I. Phytoplankton in Deep Lakes of the Dinaric Karst: Functional Biodiversity and Main Ecological Features. *Plants.* 2024. Vol. 13(16). P. 2252. URL: https://doi.org/10.3390/plants13162252
11. Teta R., Esposito G., Casazza M., Zappa C. J., Endreny T. A., Mangoni A., ... & Lega M. Bioindicators as a tool in environmental impact assessment: Cyanobacteria as a sentinel of pollution. *International Journal of Sustainable Development and Planning.* 2019. Vol.14. 1. P. 1–8. URL: https://doi.org/10.2495/SDP-V14-N1-1-8
12. Van Dam H., Mertens A., Sinkeldam J. A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from the Netherlands. *Netherlands Journal Aquatic Ecology*. 1994. Vol. 28. P. 117–133.
13. Van der Nagel Charlotte, Hannoun Deena, Tietjen Todd. Stable phytoplankton community compositions in Lake Mead (Nevada-Arizona, USA) during two decades of severe drought. *Environmental Science and Ecotechnology*. 2025. 23. 100491.

Дата першого надходження статті до видання: 30.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

ЕКОЛОГІЯ ПРИРОДНО-ЗАПОВІДНИХ ТЕРИТОРІЙ

УДК 502/504
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.16

ОЦІНКА ФУНКЦІОНУВАННЯ ТА ЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИРОДНО-ЗАПОВІДНОГО ФОНДУ УКРАЇНИ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ

Бакуліч О.О., Кухтик Н.О., Крюковська Л.І., Кобзиста О.П.
Національний транспортний університет
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, 01010, м. Київ
nttn@i.ua, natakuchtik@gmail.com, krjukovska@gmail.com, kobzysta@ukr.net

Повномасштабна збройна агресія російської федерації проти України, що розпочалася 24 лютого 2022 року, спричинила значні екологічні наслідки, які безпосередньо вплинули на функціонування та збереження природно-заповідного фонду України. Заповідні території, що відіграють ключову роль у підтриманні біорізноманіття, екологічної рівноваги та виконанні екосистемних функцій, зазнали різних видів антропогенного та воєнного впливу, зокрема пожеж, мінування територій, руйнування природних ландшафтів, забруднення ґрунтів і водних об'єктів. У статті здійснено комплексну оцінку функціонування об'єктів природно-заповідного фонду України в умовах воєнного стану, проаналізовано масштаби та характер пошкоджень природних екосистем, а також визначено основні ризики для збереження біорізноманіття. У дослідженні використано методи аналізу статистичних даних, дистанційного зондування Землі, порівняльного аналізу наукових джерел та системного підходу до оцінювання екологічних наслідків бойових дій. Розглянуто основні типи ушкоджень заповідних територій, серед яких воєнні пожежі, мінування, пересування важкої техніки, будівництво фортифікаційних споруд, втручання у гідрологічний режим та хімічне забруднення компонентів довкілля. Встановлено, що значна частина природоохоронних територій України опинилася в зоні бойових дій або тимчасової окупації, що призвело до порушення природоохоронного режиму та деградації екосистем. На основі отриманих результатів запропоновано підходи до оцінювання екологічних втрат і визначення пріоритетів відновлення природних територій. Практична значущість дослідження полягає у формуванні наукового підґрунтя для розроблення стратегій відновлення природно-заповідного фонду України в умовах післявоєнної відбудови та забезпечення довгострокового збереження біорізноманіття. *Ключові слова:* природно-заповідний фонд; екосистема; екологічні наслідки війни; біорізноманіття; екологічний моніторинг; деградація екосистем; екологічні збитки; екологічна безпека; сталий розвиток

Assessment of functioning and conservation of the nature reserve fund of Ukraine under martial law. Bakulich O., Kukhtyk N., Kriukovska L, Kobzysta O.

The full-scale armed aggression of the russian federation against Ukraine, which began on February 24, 2022, has caused significant environmental consequences that directly affected the functioning and preservation of Ukraine's nature reserve fund. Protected areas, which play a key role in maintaining biodiversity, ecological balance and ecosystem functions, have been subjected to various forms of anthropogenic and military impact, including fires, landmine contamination, destruction of natural landscapes, and pollution of soils and water bodies. The article provides a comprehensive assessment of the functioning of Ukraine's nature reserve fund objects under martial law, analyses the scale and nature of damage to natural ecosystems, and identifies the main risks to biodiversity conservation. The study employs methods of statistical data analysis, remote sensing, comparative analysis of scientific sources, and a systematic approach to assessing the environmental consequences of hostilities. The main types of damage to protected areas are examined, including war-related fires, mining, movement of heavy military equipment, construction of fortifications, interference with hydrological regimes, and chemical contamination of environmental components. It has been established that a significant portion of Ukraine's protected areas found themselves in combat zones or under temporary occupation, leading to violations of conservation regimes and ecosystem degradation. Based on the results obtained, approaches to assessing environmental losses and determining priorities for the restoration of natural areas are proposed. The practical significance of the study lies in establishing a scientific foundation for developing strategies for the restoration of Ukraine's nature reserve fund in the context of post-war reconstruction and ensuring the long-term conservation of biodiversity. *Key words:* nature reserve fund; ecosystem; environmental consequences of war; biodiversity; ecological monitoring; ecosystem degradation; environmental damage; ecological security; sustainable development

Постановка проблеми. Природно-заповідний фонд України є основним елементом системи збереження біорізноманіття, підтримання екологічної рівноваги та забезпечення екологічної безпеки та сталого розвитку територій. До його складу входять природні заповідники, біосферні заповідники, національні природні парки, регіональні ландшафтні парки, заказники та інші об'єкти, що викону-

© Бакуліч О.О., Кухтик Н.О., Крюковська Л.І., Кобзиста О.П., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

ють важливі природоохоронні, наукові, рекреаційні та освітні функції. Ефективність функціонування цієї системи визначає можливості збереження природних екосистем, генетичного різноманіття флори і фауни, а також формування екологічної безпеки держави [1].

В умовах воєнного стану природно-заповідний фонд України зазнає безпрецедентних антропогенних навантажень і трансформацій, пов'язаних із веденням бойових дій, мінуванням територій, руйнуванням природних ландшафтів, пожежами, забрудненням ґрунтів, водних об'єктів і атмосферного повітря. Значна частина об'єктів природно-заповідного фонду опинилася на тимчасово окупованих територіях або в зоні активних бойових дій, що істотно ускладнює здійснення природоохоронних заходів, наукового моніторингу та управління цими територіями. У таких умовах виникає необхідність комплексного оцінювання стану функціонування природоохоронних територій, визначення рівня їх збереженості та розроблення ефективних механізмів їхнього відновлення і подальшого управління [2].

Актуальність дослідження зумовлена тим, що воєнні дії створюють нові екологічні виклики для системи природно-заповідного фонду, які потребують наукового осмислення та розроблення відповідних підходів до оцінки його функціонування. Важливим завданням є визначення масштабів негативного впливу воєнних факторів на природні екосистеми, аналіз змін у структурі природно-заповідних територій та встановлення рівня їх екологічної стійкості. Водночас постає питання збереження природних комплексів, підтримання їх екосистемних функцій та формування науково обґрунтованих управлінських рішень щодо їх відновлення у післявоєнний період [3].

Предметом дослідження є процеси функціонування та збереження природно-заповідного фонду України в умовах воєнного стану, а також фактори, що визначають рівень його екологічної стабільності та здатності до відновлення. Основними складовими дослідження виступають оцінка сучасного стану природоохоронних територій, аналіз впливу воєнних дій на природні екосистеми, визначення основних загроз для біорізноманіття та обґрунтування підходів до збереження і відновлення природно-заповідного фонду.

Таким чином, наукова проблема полягає у необхідності формування комплексного підходу до оцінки функціонування природно-заповідного фонду України в умовах воєнного стану, що дозволить визначити рівень його збереженості, встановити ключові екологічні ризики та обґрунтувати напрями підвищення ефективності управління природоохоронними територіями. Вирішення цієї проблеми має важливе значення як для розвитку екологічної науки, так і для практичної діяльності у сфері природоохоронного управління, забезпечуючи наукове підґрунтя для відновлення та збереження природних екосистем України.

Актуальність дослідження зумовлена насамперед безпрецедентними масштабами екологічних наслідків повномасштабної збройної агресії, які становлять пряму загрозу не лише для біорізноманіття України, але й для екологічної стабільності всього регіону. Природно-заповідний фонд, що є основою екологічної мережі держави, потребує термінового наукового осмислення нових викликів, пов'язаних із веденням бойових дій, мінуванням та хімічним забрудненням природних територій. В умовах, коли значна частина заповідних об'єктів опинилася в зоні активних бойових дій або тимчасової окупації, традиційні механізми управління та моніторингу природоохоронних територій виявились недостатніми, що обумовлює необхідність розроблення нових науково обґрунтованих підходів до їх збереження та відновлення. Крім того, Україна взяла на себе міжнародні зобов'язання у сфері охорони довкілля та сталого розвитку, виконання яких в умовах воєнного стану вимагає адаптації існуючих інструментів екологічної політики та пошуку ефективних механізмів мінімізації воєнної екологічної шкоди. Таким чином, наукове дослідження стану, функціонування та збереження природно-заповідного фонду України в умовах воєнного стану є не лише теоретично значущим, але й практично необхідним для забезпечення екологічної безпеки держави та формування стратегії повоєнного відновлення природних екосистем.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Представлене дослідження виконане в контексті реалізації державної екологічної політики України, спрямованої на збереження природно-заповідного фонду та забезпечення екологічної безпеки в умовах воєнного стану. Робота відповідає положенням Закону України «Про природно-заповідний фонд України», Стратегії державної екологічної політики України на період до 2030 року, а також узгоджується з міжнародними зобов'язаннями держави в рамках Конвенції про біологічне різноманіття та Цілей сталого розвитку ООН.

З наукової точки зору, дослідження розвиває теоретико-методологічні засади оцінки екологічних наслідків збройних конфліктів для природоохоронних територій, поглиблює уявлення про механізми деградації та відновлення природних екосистем в екстремальних умовах антропогенного навантаження. Отримані результати формують наукове підґрунтя для подальших досліджень у сфері екології, природоохоронного менеджменту та екологічної безпеки.

У практичному відношенні результати роботи можуть бути використані органами державного управління у сфері охорони навколишнього природного середовища при розробленні програм відновлення пошкоджених природних територій, форму-

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

ванні механізмів відшкодування екологічних збитків, заподіяних внаслідок збройної агресії, а також при вдосконаленні системи екологічного моніторингу об'єктів природно-заповідного фонду. Крім того, запропонована концептуальна модель поетапного відновлення заповідних територій може слугувати практичним інструментом для адміністрацій природоохоронних установ у процесі планування та реалізації відновлювальних заходів у повоєнний період.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проблематика впливу збройних конфліктів на довкілля та природоохоронні території активно досліджується у світовій науковій літературі. Фундаментальний внесок у вивчення екологічних наслідків російсько-української війни зробили Pereira P., Bašić F., Bogunovic I. та Barcelo D. [3], які вже у 2022 р. проаналізували масштаби забруднення повітря, ґрунтів і водних об'єктів та охарактеризували ризики для біорізноманіття. Комплексну оцінку стану природоохоронних територій України після початку повномасштабного вторгнення здійснили Timmins H. L. зі співавторами [4], проаналізувавши пошкодження 21 об'єкту ПЗФ на основі польових даних та супутникових знімків. Hartmane I., Getman A. P., Yaroshenko O. M. та Anisimova H. V. [5] дослідили стан природи України з позицій екологічного права та охорони довкілля в умовах воєнного стану.

Дослідники відзначають, що бойові дії спричиняють значні порушення природних екосистем, включаючи знищення рослинного покриву, деградацію ґрунтів, порушення гідрологічних процесів і втрату біорізноманіття. За даними CEOBS, до кінця жовтня 2023 р. пожежі охопили близько 12 000 км² території України, причому 75% з них виникли у смузі завширшки 30 км від лінії фронту [6]. Значна увага в сучасних дослідженнях приділяється застосуванню дистанційного зондування Землі та геоінформаційних систем для моніторингу змін природних територій у період конфліктів [3; 7].

Українські та міжнародні науковці спільно досліджують екологічні наслідки війни для природно-заповідного фонду України. Kucher A. зі співавторами [8] оцінили збитки заповідним об'єктам в межах регіональних ландшафтних парків; Filho W. L. зі співавторами [7] детально проаналізували стан природоохоронних зон у чотирьох заповідниках Київської та Сумської областей. За даними Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України, 20% природних заповідників країни (812 об'єктів) зазнали значних пошкоджень [9]. Subiros J. V., Niemets L. та Sehida K. [10] підрахували, що до квітня 2024 р. прямий вплив бойових дій зазнали 37,7% природоохоронних територій країни. Проте комплексна оцінка функціонування природно-заповідного фонду України в умовах воєнного стану потребує подальших досліджень, що зумовлює актуальність даної роботи.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. На сьогодні в Україні недостатньо розробленими залишаються питання кількісної оцінки екологічних збитків, завданих заповідним територіям внаслідок бойових дій, а також методологічні підходи до визначення рівня екологічної стійкості природних екосистем в умовах надзвичайного антропогенного навантаження. Окремою невирішеною проблемою є відсутність науково обґрунтованої системи пріоритизації відновлювальних заходів для пошкоджених природоохоронних територій з урахуванням їхньої екологічної цінності, ступеня деградації та наявних ресурсів.

Практично не дослідженим залишається питання адаптації міжнародного досвіду відновлення природних територій після збройних конфліктів до українських реалій з урахуванням специфіки вітчизняного природно-заповідного фонду, правового регулювання та екологічних умов. Поза увагою дослідників здебільшого залишається й проблема забезпечення екологічної безпеки та безперервності моніторингу природоохоронних територій в умовах обмеженого доступу через активні бойові дії або мінування.

Метою дослідження є комплексна оцінка особливостей функціонування та стану збереження об'єктів природно-заповідного фонду України в умовах воєнного стану для забезпечення збереження та відновлення біорізноманіття, а також обґрунтування концептуальної моделі поетапного відновлення заповідних територій у повоєнний період.

Новизна. Наукова новизна дослідження полягає у здійсненні комплексної оцінки функціонування природно-заповідного фонду України як цілісної системи в умовах повномасштабної збройної агресії та визначенні структури й частки основних типів воєнних пошкоджень природних екосистем. Вперше запропоновано концептуальну модель поетапного відновлення заповідних територій, що інтегрує принципи екологічної безпеки, систематичного моніторингу та сталого розвитку.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічне значення дослідження полягає у розробленні комплексного підходу до оцінки екологічних наслідків збройних конфліктів для природоохоронних територій, що поєднує методи статистичного аналізу, дистанційного зондування Землі та порівняльного аналізу міжнародного досвіду. Запропонована концептуальна модель відновлення заповідних територій може слугувати науково-методичною основою для розроблення аналогічних підходів в інших країнах, що зазнали екологічних наслідків збройних конфліктів.

Виклад основного матеріалу. До початку повномасштабної війни природно-заповідний фонд України включав понад вісім тисяч об'єктів різних категорій, серед яких природні та біосферні заповідники, національні природні парки, заказники та пам'ятки природи. Загальна площа заповідних тери-

торій становила 4,5 млн га, що відповідало 6,8% площі країни [1; 2].

В умовах воєнного стану функціонування природоохоронних територій зазнало значних змін. Частина заповідних об'єктів опинилася в зоні активних бойових дій або на територіях, де здійснюється військова діяльність.

За результатами спостережень та статистичних сучасних даних встановлено, що значна частина природно-заповідного фонду України зазнала прямого або опосередкованого впливу воєнних дій. Особливо вразливими виявились степові, лісові та водно-болотні екосистеми, які завжди характеризувались високим рівнем біорізноманіття. За даними CEOBS, близько 2 000 об'єктів ПЗФ знаходились на тимчасово окупованих або окупованих територіях станом на кінець 2023 р., а 37,7% природоохоронних територій зазнали прямого впливу бойових дій [6; 10].

Встановлено, що деградація природних екосистем відбувається не лише внаслідок безпосередніх руйнувань, але й через порушення природоохоронного режиму, зменшення можливостей екологічного моніторингу та обмеження діяльності природоохоронних установ.

Порівняння отриманих результатів з міжнародним досвідом дослідження екологічних наслідків збройних конфліктів показує, що для ефективного відновлення природних територій необхідне застосування комплексних підходів, які поєднують екологічний моніторинг, використання дистанційних технологій та довгострокові програми відновлення екосистем.

Природні екосистеми природно-заповідного фонду України пошкоджуються здебільшого внаслідок пожеж, мінування, хімічного та механічного забруднення ґрунтів, водних об'єктів та їх ресурсів (рис.1).

Воєнні дії спричиняють комплексний негативний вплив на території та об'єкти природно-заповідного фонду України (табл.1).

Воєнні пожежі є результатом обстрілів територій, падіння уламків ракет та БПЛА, вибухів боєприпасів. Пожежі, що виникають можуть носити локальний характер, але у більшості випадків охоплюють значні площі територій природно-заповідного фонду [11]. Швидкість розповсюдження пожеж залежить від типу рослинності, який домінує на даній території, кліматичних, гідрологічних, геогра-



Рис. 1. Військові пошкодження об'єктів природно-заповідного фонду України

Таблиця 1

Структура основних типів пошкоджень природних екосистем ПЗФ [4; 6; 7]

№	Тип пошкодження	Характер впливу на екосистеми	Частка впливу, %
1	Пожежі повязані із воєнними діями	Знищення рослинного покриву, деградація ґрунтів, зменшення біорізноманіття	38
2	Мінування територій	Тривала небезпека для фауни, обмеження природоохоронної діяльності	27
3	Руйнування механічне	Руйнування ґрунтового покриву, порушення ландшафтної структури	18
4	Хімічне забруднення	Накопичення токсичних речовин у ґрунтах та водному середовищі	10
5	Порушення гідрологічного режиму	Зміна водного балансу екосистем	7

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

фічних та інших умов. Наслідками воєнних пожеж є деградація ґрунтового та рослинного покриву, знищення безхребетних тварин, що населяють верхній ґрунтовий шар. Воєнні пожежі знищують місця оселення, зимівлі, осередки розмноження тварин, тим самим призводять до незворотних змін екосистем.

Унаслідок бойових дій території природно-заповідного фонду можуть зазнавати мінного забруднення та накопичення вибухонебезпечних предметів, що створює пряму загрозу для біотичних зв'язків між тваринними організмами, а також формує значний негативний вплив на всі аспекти пов'язані з існуванням тваринного світу [12]. Загибель або травмування під час міграції до місць розмноження чи зимівлі є довготривалою загрозою для збереження та відновлення популяцій. Мінні поля та залишки боєприпасів становлять загрозу для науковців, які проводять дослідження, а також працівників заповідників, які проводять природоохоронні заходи.

Небезпеку для природних екосистем становлять дії, що призводять до їх механічного руйнування. Такі руйнування виникають під час пересування військової техніки, створення бліндажів, траншей, фортифікаційних споруд, інших укріплень, при цьому відбувається руйнування рослинного покриву та природної структури ландшафтів [13].

Через бойові дії у ґрунти, поверхневі та підземні води потрапляють паливно-мастильні матеріали, продукти згоряння боєприпасів, сполуки токсичних металів. Це призводить до накопичення токсичних сполук в організмі рослин і тварин та змінює перебіг біохімічних процесів зниження екологічної стійкості природних комплексів.

Також значним є порушення гідрологічного режиму природних територій, яке виникає через руйнування гідротехнічних споруд, пошкодження водних систем та зміну природних водних потоків. Такі процеси можуть призводити до затоплення або, навпаки, осушення окремих ділянок природних територій, що негативно впливає на водно-болотні екосистеми та види, пов'язані з водним середовищем. Зазначені зміни можуть розглядатися як прояви екологічної мілітаризації водних об'єктів, що супроводжується трансформацією природних гідрологічних процесів [14].

Слід зазначити, що для відновлення природоохоронних територій у повоєнний період необхідно обрати та розробити найбільш адаптовану модель відновлення певної території, що зазнала руйнувань (рис.2).

Запропонована концептуальна модель поетапного відновлення заповідних територій спирається на інтегрованому підході до управління екосистемами. У структурі моделі було розкрито чотири основні етапи, які окреслюють логічну послідовність прийняття управлінських рішень у сфері природоохоронної діяльності.

Перший етап: «Пріоритетні об'єкти» – передбачає ідентифікацію територій, що потребують першочергового втручання та проведення їх оцінки й зонування. На цьому етапі відбувається визначення екологічної цінності територій, рівня їх деградації та

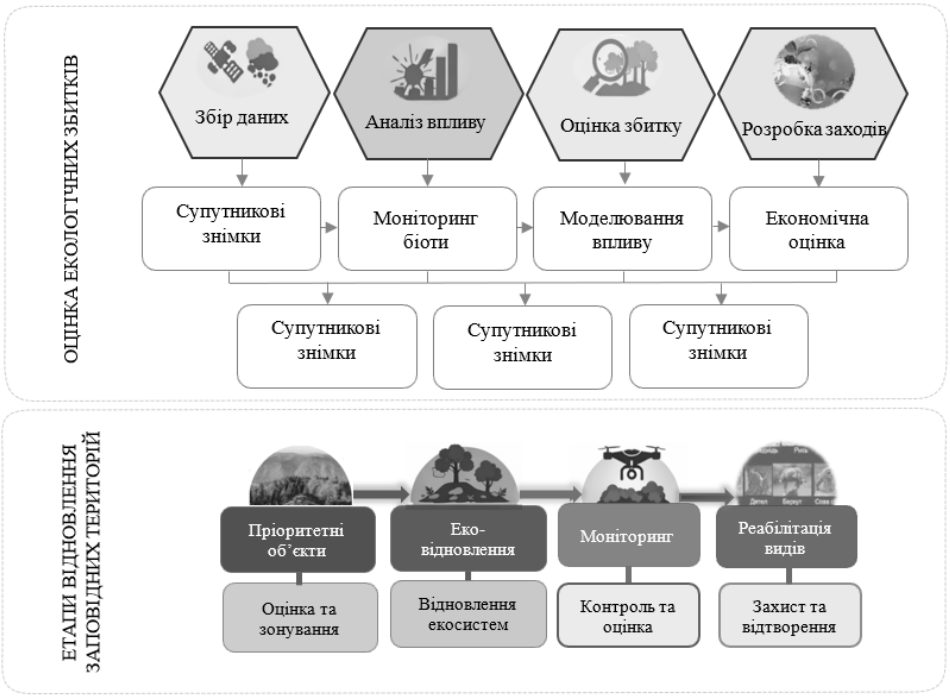


Рис. 2. Концептуальна модель поетапного відновлення заповідних територій

ступеня антропогенного навантаження, що дозволяє обґрунтувати пріоритетність відновлювальних заходів.

Другий етап: «Еко-відновлення» – спрямований на реалізацію комплексу заходів з відновлення природних екосистем. Він пов'язаний із питаннями якісного відновлення біотопів, реконструкції природних середовищ існування, а також відтворення функціональних зв'язків між компонентами екосистем.

Третій етап: «Моніторинг» – передбачає здійснення систематичного контролю за станом відновлених територій та оцінку ефективності та дієвості впроваджених заходів. Застосування сучасних технологій, зокрема дистанційного зондування та безпілотних літальних апаратів дасть змогу забезпечити не лише оперативність в роботі, але й отримувати достовірні дані.

Четвертий етап: «Реабілітація видів» – охоплює заходи, спрямовані на збереження, захист та відтворення біологічного різноманіття та видового багатства. На цьому етапі можливо реалізувати програми відновлення популяцій рідкісних та зникаючих видів, створювати сприятливі умови для їх існування та мінімізувати негативний вплив антропогенних факторів.

Таким чином, представлена схема відображає цілісну систему екологічного управління процесами відновлення природно-заповідних територій, поєднуючи аналітичні, практичні та контрольні компоненти.

Реалізація зазначених заходів є невід'ємною складовою досягнення Цілей сталого розвитку ООН, зокрема ЦСР 15 «Життя на суші», яка передбачає захист, відновлення і сприяння сталому використанню наземних екосистем [15]. Забезпечення екологічної безпеки заповідних територій у воєнний і повоєнний періоди вимагає комплексного підходу, що поєднує правові, управлінські та технологічні інструменти захисту природних комплексів від антропогенного навантаження [16]. Систематичний екологічний моніторинг із використанням дистанційного зондування Землі та геоінформаційних систем дозволяє своєчасно фіксувати зміни стану екосистем, оцінювати динаміку відновлення та коригувати природоохоронні заходи [17]. Таким чином, інтеграція принципів сталого розвитку в стратегії управління природно-заповідним фондом є ключовою умовою довгострокового збереження біорізноманіття України в умовах воєнного стану та після його завершення. Запропонований підхід дозволяє підвищити ефективність природоохоронних заходів, забезпечити збереження біорізноманіття та сприяти досягненню цілей сталого розвитку.

Головні висновки. У результаті проведеного дослідження встановлено, що воєнний стан створює значні ризики для функціонування та збереження природно-заповідного фонду України. Бойові дії спричиняють масштабні пошкодження природних екосистем, що проявляються у руйнуванні природних ландшафтів, деградації ґрунтів, порушенні гідрологічних процесів і втраті біорізноманіття.

Основними факторами негативного впливу на природні території є воєнні пожежі, мінування територій, механічне руйнування екосистем, хімічне забруднення та порушення водного режиму.

Для забезпечення ефективного збереження природно-заповідного фонду в умовах воєнного стану необхідно застосовувати сучасні прийоми та підходи до управління, впроваджувати сучасні методи екологічного моніторингу, розробляти програми відновлення пошкоджених територій та посилювати міжнародне співробітництво у сфері охорони навколишнього середовища.

Перспективи використання результатів дослідження. Отже, отримані результати можуть бути використані для формування стратегій післявоєнного відновлення природних екосистем та удосконалення системи управління природно-заповідним фондом України.

Література

1. Barabash O., Khrutba O., Pokshevnytska T., Tarasiuk M. The realisation of sustainable development goals through the implementation of international environmental projects with the implementation of transport infrastructure solutions. Intelligent transport systems: Ecology, safety, comfort (ITSESQC 2024) / eds. O. Slavinska, V. Danchuk, O. Kunytska, O. Hulchak. Cham: Springer, 2025. Vol. 1335. P. 14–28. DOI: 10.1007/978-3-031-87376-8_2
2. Барабаш О. В., Хрутьба Ю. С., Покшевницька Т. В. Комплексний підхід до оцінки впливу на довкілля реалізації природоохоронних проєктів. Екологічна безпека та технології захисту довкілля. 2024. № 6. С. 93–98. DOI: 10.31073/ecobezpeka202406-10
3. Барабаш О. В., Покшевницька Т. В., Хрутьба Ю. С. Оцінка впливу на довкілля як інструмент забезпечення екологічної безпеки та сталого розвитку в умовах антропогенного забруднення та воєнних дій. Екологічні науки. 2025. № 2(59). DOI: 10.32846/2306-9716/2025.eco.2-59.24
4. Pereira P., Bašić F., Bogunovic I., Barcelo D. Russian-Ukrainian war impacts the total environment. Science of the Total Environment. 2022. Vol. 837. Article 155865. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.155865
5. Timmins H. L., Petrovych O., Drapaliuk A., Polianska K., Vasyliuk O., Bragger J., Kuzemko A., Vishnevsky D. The state of Ukraine's protected areas: an interim update on damages from the full-scale invasion. PARKS: The International Journal of Protected Areas and Conservation. 2023. Vol. 29, № 2. P. 52–63. DOI: 10.2305/WUER4443
6. Hartmane I., Biyashev B., Getman A. P., Yaroshenko O. M., Anisimova H. V. Impacts of war on Ukrainian nature. International Journal of Environmental Studies. 2024. Vol. 81, № 1. P. 455–462. DOI: 10.1080/00207233.2024.2314856

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

7. Conflict and Environment Observatory (CEOBS). Ukraine conflict environmental briefing: Nature. 2024. URL: https://ceobs.org/ukraine-conflict-environmental-briefing-nature/ (дата звернення: 23.04.2026).
8. Filho W. L., Fedoruk M., Eustachio J. H. P., Splotydel A., Smaliychuk A., Szynkowska-Jóźwik M. I. The environment as the first victim: the impacts of the war on the preservation areas in Ukraine. Journal of Environmental Management. 2024. Vol. 364. Article 121399. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.121399
9. Kucher A., Lialchenko A., Melnyk L., Lozinska T., Shevchenko O., Kovalenko O. Impact of War on the Natural Preserve Fund: Challenges for the Development of Ecological Tourism and Environmental Protection. Journal of Environmental Management and Tourism. 2023. Vol. 14, № 5. P. 2414–2425. DOI: 10.14505/jemt.v14.5(69).22
10. Майбутнє природоохоронних територій в Україні: документ для обговорення щодо відновлення та реформування природоохоронних територій / О. Петрович, Т. Ямелинець, І. Люцій, К. Янц; ред. Т. Пезольд Кнежевич. 2024. 44 с. URL: https://wwf.ua/?15628441/WWF-Ukrayina-predstaviv-dokument-shchodo-vidnovlennya-ta-eformuvannya-pryrodookhoronnykh-terytoriy (дата звернення: 23.04.2026).
11. Subiros J. V., Niemets L., Sehida K. The Impact of the Russian Invasion of Ukraine on Protected Natural Areas: A Quantitative Approach and the Opportunities and Challenges of Nature Restoration. Achieving Sustainability in Ukraine through Military Brownfields Redevelopment / eds. C. Morar, L. Berman, S. Erdal, L. Niemets. Dordrecht: Springer, 2024. DOI: 10.1007/978-94-024-2278-8_12
12. Рибалова О. В., Кочура А. С., Ярмола В. А. Вплив бойових дій на унікальні природні об'єкти України. XIV International Science Conference «Prospects for the development of science and the environment» (Гельсінкі, Фінляндія, 10–12 квітня 2023 р.). Гельсінкі, 2023.
13. Українська природоохоронна група. Війна і природно-заповідний фонд України: просторовий аналіз руйнувань. URL: https://uncg.org.ua/vijna-i-pryrodno-zapovidnyj-fond-prost-analiz/ (дата звернення: 23.04.2026).
14. Покшевницька Т. В. Проблеми розподілу впливу антропогенного забруднення на водні об'єкти України в контексті екологічної мілітаризації. Екологічна безпека та технології захисту довкілля. 2024. № 6/1. DOI: 10.31073/ecobezpeka202406/1-09
15. Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року: Указ Президента України від 30.09.2019 р. № 722/2019. URL: https://lnk.ua/7CTE3QzhG (дата звернення: 05.03.2026).
16. Сокол М. В., Богданова А. О. Забезпечення екологічної безпеки в Україні в умовах воєнного стану. Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: юридичні науки. 2025. Т. 36(75), № 1. DOI: 10.32782/TNU-2707-0581/2025.1/07
17. Firoz A. B., Saranaathan V., Chakraborty S., Damodharam T., Govindaraju M. Harnessing mangrove ecosystems for CO_2 sequestration: Insights from remote sensing and GIS technologies. International Journal of Biosciences. 2025. Vol. 27(1). P. 225–243. DOI: 10.12692/ijb/27.1.225-243

Дата першого надходження статті до видання: 30.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 551.583:502.4:574
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.17

ВПЛИВ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН НА ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕКОСИСТЕМ ПРИРОДНО-ЗАПОВІДНИХ ТЕРИТОРІЙ

Кудряшова К.М.[1], **Олішевська Ю.А.**[2]
[1]Національний університет «Чернігівська політехніка»
вул. Шевченка, 95, 14030, м. Чернігів
[2]Київський національний університет імені Тараса Шевченка
вул. Володимирська, 64/13, 01601, м. Київ
kud@stu.cn.ua, yuliaolishevska@knu.ua

Стаття оцінює вплив кліматичних змін на екосистеми природних заповідників України. Дослідження зосереджене на тих місцях, де природні процеси зберегли відносну цілісність. Саме тому вони добре відображають реакцію довкілля на підвищення температури, зміну режиму опадів, дефіцит вологи та зростання частоти екстремальних явищ. Методологія роботи поєднує кілька підходів. Це порівняльний аналіз кліматичних і гідрологічних показників. Використане просторове зіставлення регіональних відмінностей. Також використано еколого-економічний підхід для оцінювання результативності природоохоронних рішень. Для узагальнення результатів заповідні території згруповано за типом екосистем, рівнем вразливості та характером домінуючих загроз. Дослідження показало, що найбільше навантаження припадає на степові, прибережні та болотні природні комплекси. Для цих територій характерне посилення посушливості. Також там відбувається перегрівання поверхні ґрунту та зниження водозабезпечення. Крім того, зростає пожежна небезпека та перебудовується видовий склад біоти. У лісових заповідниках фіксується ослаблення деревостанів. Погіршується природне поновлення лісу і поширюються шкідники. Доведено, що звичайний охоронний режим не дає змоги належним чином компенсувати нові кліматичні ризики. Найкращий результат забезпечує поєднання кількох елементів. Це безперервний моніторинг і використання GIS-інструментів. Впровадження програм відновлення водного режиму і підтримка рідкісних видів флори. Практичне значення результатів полягає в тому, що їх можуть використовувати адміністрації заповідників, органи державного управління та місцеві громади. Це потрібно під час планування адаптаційних програм до 2030 року. У статті також запропоновано орієнтири для пріоритетного розподілу ресурсів між територіями з різним ступенем ризику. Наукова новизна роботи полягає у створенні інтегрованої системи оцінювання природних заповідників України. Ця система об'єднує кліматичні, гідрологічні, біологічні та управлінські показники. Таке об'єднання створює основу для переходу до адаптивного управління екосистемами. *Ключові слова:* зміна клімату, природні заповідники, екосистеми, біорізноманіття, адаптація, екологічний моніторинг.

Impact of climate change on the functioning of ecosystems of nature reserved areas. Kudriashova K., Olishevska Yu.
The article assesses the impact of climate change on the ecosystems of Ukraine's nature reserves. The study focuses on areas where natural processes have remained relatively intact. For this reason, they clearly reflect environmental responses to rising temperatures, changing precipitation patterns, moisture deficits, and the growing frequency of extreme events. The research methodology combines several approaches. These include comparative analysis of climatic and hydrological indicators. Spatial comparison of regional differences was applied. An ecological and economic approach was also used to evaluate the effectiveness of environmental protection decisions. To generalize the findings, protected areas were grouped by ecosystem type, vulnerability level, and the nature of dominant threats. The study showed that the greatest pressure falls on steppe, coastal, and wetland natural complexes. These territories are characterized by increasing aridity. Soil surface overheating and declining water availability are also observed there. In addition, fire risk is rising and the species composition of biota is changing. Forest reserves demonstrate weakening tree stands. Natural forest regeneration is deteriorating, and pest outbreaks are spreading. It has been proven that the conventional protection regime does not adequately compensate for new climate risks. The best results are achieved through a combination of several elements. These include continuous monitoring and the use of GIS tools. They also include the implementation of water regime restoration programs and support for rare plant species. The practical significance of the results lies in their potential use by reserve administrations, public authorities, and local communities. This is necessary when planning adaptation programs up to 2030. The article also proposes guidelines for priority allocation of resources among territories with different risk levels. The scientific novelty of the work lies in the creation of an integrated assessment system for Ukraine's nature reserves. This system combines climatic, hydrological, biological, and managerial indicators. Such integration creates a basis for the transition to adaptive ecosystem management. *Key words:* climate change, nature reserves, ecosystems, biodiversity, adaptation, environmental monitoring.

Постановка проблеми. Кліматичні зміни дедалі помітніше перетворюють природні системи України. Найчутливіше на ці процеси реагують території природно-заповідного фонду. Адже тут збережені відносно цілісні екосистеми, які дають змогу фіксувати реальні тенденції без значного господарського спотворення. Підвищення температури повітря, нестійкий режим опадів, тривалі посухи, зростання частоти пожеж та порушення гідрологічного балансу вже сьогодні змінюють стан лісів, степів, боліт і водно-болотних угідь. Дослідження цих процесів набуває особливої ваги, оскільки природні заповідники

© Кудряшова К.М., Олішевська Ю.А., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

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

виконують ширші функції, ніж просто охорона рідкісних видів.

Традиційні механізми охорони природи формувалися за інших кліматичних умов. Нині вони дедалі частіше не забезпечують належного результату. Сам режим заповідання не здатен усунути деградацію ґрунтів, пересихання водойм, зміщення ареалів видів або послаблення природної регенерації рослинності. Тому виникає потреба в переході до адаптивної моделі управління, яка спирається на моніторинг, просторовий аналіз і прогнозування ризиків.

Актуальність дослідження. Традиційні механізми охорони природи формувалися за інших кліматичних умов. Нині вони дедалі частіше не забезпечують належного результату. Сам режим заповідання не здатен усунути деградацію ґрунтів, пересихання водойм, зміщення ареалів видів або послаблення природної регенерації рослинності. Тому виникає потреба в переході до адаптивної моделі управління, яка спирається на моніторинг, просторовий аналіз і прогнозування ризиків.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Авторський доробок безпосередньо пов'язаний із вирішенням актуальних завдань екологічної безпеки, адаптації природоохоронної політики та вдосконалення системи управління природно-заповідним фондом України в умовах кліматичних змін. Практична спрямованість дослідження полягає у формуванні підходів до моніторингу ризиків, просторового планування природоохоронних заходів і раціонального розподілу ресурсів між уразливими територіями. Отримані результати можуть бути використані органами влади, науковими установами та адміністраціями заповідників.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У публікації Іванюти С. П., Коломієць О. О., Малиновської О. А. та Якушенко Л. М. [5] оцінено кліматичні ризики для природних ресурсів України та розглянуто механізми державної адаптації. Автори показують, що зростання температури разом із водним дефіцитом призводить до довгострокових екологічних втрат. Водночас питання того, як саме реагують заповідні екосистеми, залишилося поза межами цього дослідження. Радомська М. М., Гуз В. В. та Ярохмедова І. В. [18] зосередили увагу на вразливості національних природних парків до кліматичних змін. Вони слушно зауважують, що ризики розподілені нерівномірно між різними територіями, а отже, потрібні цілеспрямовані адаптаційні заходи. Однак порівняльний аналіз різних типів заповідників України в цій роботі висвітлений недостатньо.

Так Федонюк В. В. [12] наводить конкретні факти кліматичних трансформацій у межах парку «Прип'ять – Стохід». Дослідження фіксує зсув гідрологічних параметрів і посилення природної нестійкості. Водночас економічний бік природоохоронних втрат залишився поза увагою автора. Сербов М. Г., Заводній Т. В. та Маргітай Л. Г. [10] дослідили стан водних екосистем України та окреслили можливі варіанти їх збереження. Вони довели, що водойми є чутливими до температурних і гідрохімічних коливань. Але для заповідних водно-болотних угідь конкретні наслідки залишаються нез'ясованими і потребують подальшого уточнення. У роботах Чорноброва О. Ю. [14] та Яницького В. [21] проаналізовано лісові екосистеми під впливом потепління. Отримані результати засвідчують послаблення деревостанів, зміни продуктивності та зростання ризиків всихання. Проте бракує спроби інтегрувати лісові дані в загальну систему заповідного менеджменту.

Юхименко Ю. С., Данильчук О. В. та Бойко Л. І. [15] зафіксували зміщення строків цвітіння деревних рослин у степовій зоні. Це спостереження підтверджує перебудову сезонних циклів. Однак не розкрито, як такі зміни впливають на стійкість природних резерватів. Воєвода В., Совгіра С. та Дармофал Е. [2] висвітлили зв'язок між біорізноманіттям заповідних територій та економікою охорони природи. Вони акцентують на втраті ресурсної цінності екосистем. Разом із тим у роботі бракує кількісних моделей фінансування адаптаційних заходів. Скляр В. та ін. [20] дослідили реакцію деревних видів на глобальні кліматичні зрушення. Виявлено, що різні види мають неоднакову стійкість. Просторове ранжування ризиків, однак, залишилося невирішеним питанням. Отже, на основі проведеного огляду можна стверджувати, що існує потреба в окремому дослідженні. Воно має бути присвячене комплексному оцінюванню того, як кліматичні зміни впливають на екосистеми природних заповідників України.

Мета статті – оцінити вплив кліматичних змін на стан екосистем природних заповідників України.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Наразі науковий доробок у сфері вивчення кліматичних трансформацій заповідних територій України характеризується певною фрагментарністю. Основна увага дослідників зазвичай зосереджена на аналізі окремих параметрів довкілля замість вивчення цілісних екосистемних реакцій. Наявні публікації переважно описують температурну динаміку чи стан біорізноманіття як ізольовані явища та не пропонують синтетичних моделей оцінювання сукупних ризиків. Додатково спостерігається дефіцит порівняльних праць щодо специфіки реагування різних ландшафтних зон від Полісся до прибережних регіонів на глобальні виклики. Також актуальною постає потреба у створенні дієвих алгоритмів адаптивного менеджменту із залученням геоінформаційних систем та обґрунтуванням фінансових механізмів підтримки природних режимів. Вищезазначені прогалини в теорії та практиці зумовлюють актуальність і змістове спрямування цієї наукової роботи.

Новизна. Дослідження пропонує цілісну модель оцінювання впливу кліматичних змін на природні

заповідники України. Головна особливість моделі в тому, що вона враховує регіональну специфіку різних екосистем. У роботі вдалося поєднати кліматичні, гідрологічні, біологічні та управлінські параметри в єдину аналітичну систему. Запропоновано підхід, який дає змогу ранжувати заповідні території за двома критеріями. По-перше, за рівнем екологічної вразливості і по-друге, за здатністю до адаптації. Розроблено практичні орієнтири для переходу від пасивної охорони до адаптивного управління природоохоронними об'єктами.

Методологічне або загальнонаукове значення. Представлене дослідження пропонує методологічний підхід до аналізу заповідних територій, що ґрунтується на інтеграції кліматологічних даних, екологічних індикаторів та просторового моделювання. Така комбінація інструментів допомогла розглянути природні об'єкти не як ізольовані статичні одиниці, а як цілісні динамічні системи. Робота суттєво доповнює теоретичні засади оцінки екологічної вразливості ландшафтів, враховуючи як специфіку їхнього охоронного статусу, так і ступінь антропогенного впливу.

Виклад основного матеріалу. Кліматичні зміни в межах природних заповідників України до 2025 року вже формують не фоновий, а системний вплив на екосистемні процеси. Підвищення середньорічної температури повітря, зміщення сезонних меж, зростання кількості днів із температурою понад +30 °C, нестійкий сніговий режим, коливання річного стоку та збільшення тривалості бездощових інтервалів прямо змінюють структуру природних комплексів. Якщо ще десять років тому окремі коливання сприймались як погодна аномалія, то нині вони стали повторюваним режимом. Для Полісся визначальним чинником став водний дефіцит у теплий період року. Сума активних температур зросла, випаровуваність посилилася, а глибина літнього залягання ґрунтових вод на окремих ділянках збільшилась на 0,2–0,6 м. У Карпатах домінує інший процес, посилення інтенсивних опадів за короткий час. Це означає зростання паводкової енергії, ерозійного змиву та нестійкості схилів [9]. Степова зона реагує ще жорсткіше, тут зросла кількість посушливих днів, скоротився весняний період зволоження, а поверхнева температура ґрунту влітку дедалі частіше перевищує критичні значення для молодих рослинних угруповань (рис. 1).

Щоб зафіксувати регіональні відмінності, доцільно зіставити кліматичні й гідрологічні параметри по ключових заповідних масивах (табл. 1).

Наведені в таблиці 1 значення показують, що найвища напруга концентрується у степових та прибережних природних системах. Там одночасно діють перегрівання, вітрове висушування, нестача опадів і гідрохімічні зміни. Полісся формально прохолодніше, але через ослаблення водного режиму також переходить у зону високої вразливості.

Лісові екосистеми реагують повільніше, проте накопичують ризики. У соснових насадженнях спостерігається зниження приросту, частіше фіксується ослаблення дерев після теплих зим. Дубові деревостани на легких ґрунтах демонструють нерівномірність листорозпуску та більшу чутливість до літніх хвиль спеки. Це не ізольовані випадки, а вже типова картина для багатьох ділянок (рис. 2).

Степові заповідники змінюються швидше. Скорочується висота травостою, падає щільність проективного покриття, зростає частка оголеного ґрунту. За тривалого сухого періоду пилова дефляція активізується навіть у межах охоронюваних територій. Для чорноземних ґрунтів це означає втрату дрібнозему та погіршення водоутримання. Болотні екосистеми Полісся демонструють ще складнішу реакцію. Торфові горизонти при осушенні мінералізуються, виділяють вуглець і втрачають буферну функцію. Пожежна небезпека різко зростає у серпні та вересні [13]. Системний аналіз деградаційних процесів в розрізі екологічних та геофізичних показників наведений в таблиці 2.

Екологічний аналіз показує, що деградація рідко обмежується одним параметром. Якщо падає рівень води, змінюється рослинність. Якщо перегрівається ґрунт, слабшає регенерація. Якщо порушується сезонний режим, види змінюють цикли розмноження. У підсумку отримали ланцюговий ефект, де кожен компонент посилює інший. Біорізноманіття реагує на ці зміни швидше, ніж здається. У степових резерватах скорочується чисельність ентомофауни, прив'язаної до весняного цвітіння. У лісових масивах зміщується співвідношення тіньовитривалих і теплолюбних видів. У болотних системах нестійким стає гніздування водоплавних птахів через коливання мілководних площ [11].

Карпатський регіон вирізняється вертикальною міграцією видів. Рослини верхнього поясу поступово відступають угору. Враховуючи, що площа високогірних ділянок обмежена, то резерв для переміщення невеликий. Це, мабуть, один із найризикованіших процесів для локальних ендеміків. Для кількісного порівняння зіставимо зміни популяцій, ареалів та екосистемних функцій (табл. 3).

З даних таблиці 3 видно, що найбільш критичними є системи з вузьким екологічним коридором адаптації. Це болота, степові цілинні ділянки, високогір'я, малі водойми. Заповідні території України увійшли у фазу, коли пасивна охорона вже не забезпечує належного результату. Сам факт обмеження господарської діяльності зберігає природний каркас, однак не нейтралізує теплові хвилі, тривалі посухи, деградацію гідрологічного режиму чи переміщення видів. Саме тому адаптаційна політика має будуватися як система керованих природоохоронних рішень. Йдеться не про втручання заради втручання, а про точне регулювання процесів, які втратили природну рівновагу [19].

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

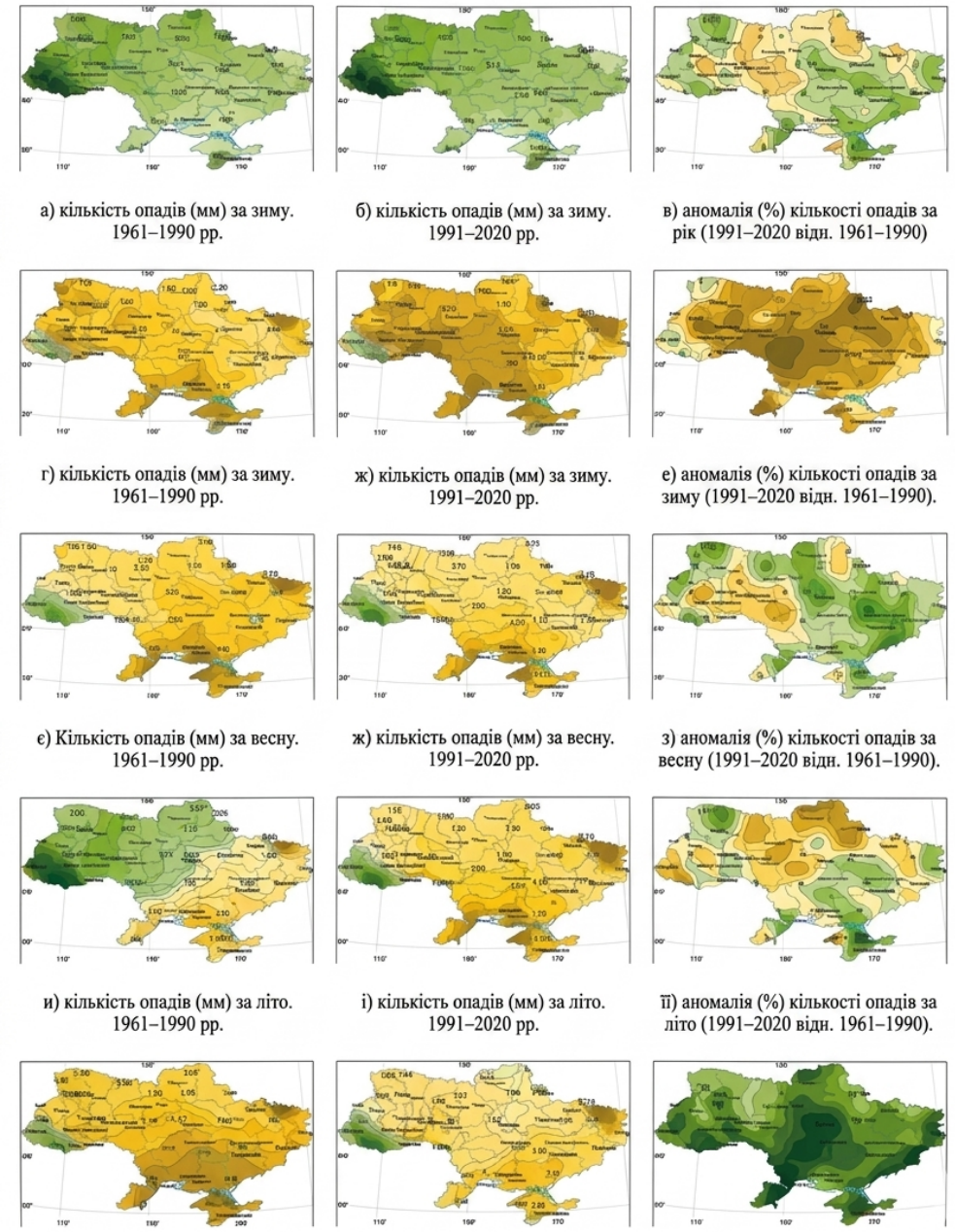


Рис. 1. Зміна просторового розподілу кількості опадів за сезон та рік та їх аномалія (%) впродовж 1991–2020 рр. відносно кліматичної норми (1961–1990 рр.) в Україні [6]

Таблиця 1

Кліматично-гідрологічна динаміка природних заповідників України у 2015–2024 рр. [3, 6]

№ з/п	Заповідна територія / регіон	Зміна середньорічної температури, °C	Днів > +30 °C, зміна	Зміна річних опадів, %	Зміна тривалості бездощового періоду, днів	Зміна рівня ґрунтових вод / стоку	Інтегральний ризик
1	Поліський природний масив	+1,3	+11	-7	+9	зниження РГВ на 0,4 м	високий
2	Шацький озерний комплекс	+1,2	+9	-5	+8	падіння рівнів озер 6–14 см	високий
3	Карпатський біосферний масив	+1,1	+6	+3	+2	паводкові піки +12%	середній

Продовження таблиці 1

№ з/п	Заповідна територія / регіон	Зміна середньорічної температури, °C	Днів > +30 °C, зміна	Зміна річних опадів, %	Зміна тривалості бездощового періоду, днів	Зміна рівня ґрунтових вод / стоку	Інтегральний ризик
4	Горганський гірський сектор	+1,0	+5	+5	+1	зростання зсувної активності	середній
5	Подільський лісостеповий сектор	+1,4	+13	-8	+11	маловоддя малих річок	високий
6	Асканійський степовий масив	+1,8	+21	-13	+18	дефіцит вологи у верхньому шарі	дуже високий
7	Чорноморський біосферний регіон	+1,7	+19	-11	+16	засолення лагун і лиманів	дуже високий

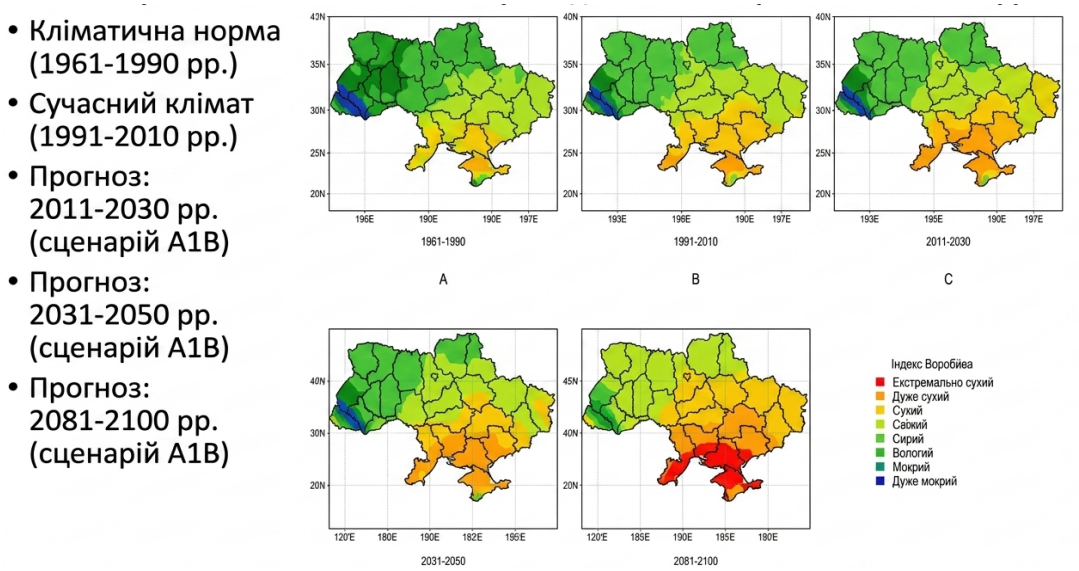


Рис. 2. Прогнози зміни кліматичних умов для сосни в Україні на 1960-2100 рр. [6]

Таблиця 2

Екологічні прояви деградації заповідних екосистем України станом на 2024 рік [1, 20]

№ з/п	Тип екосистеми	Основний деградаційний процес	Зміна біомаси / покриву	Геофізичний маркер	Біотичний наслідок	Економіко-екологічний ефект
1	Соснові ліси Полісся	всихання деревостанів	-12% приросту	зниження вологості ґрунту	спалахи шкідників	витрати на санітарні заходи
2	Діброви лісостепу	ослаблення дерев	-9% листкової маси	перегрівання ґрунту	менша регенерація	втрата рекреаційної цінності
3	Степові угруповання	розрідження травостою	-18% покриття	дефляція поверхні	зменшення кормової бази	втрата екомаршрутів
4	Болотні масиви	осушення торфовищ	-15% зволожених площ	падіння РГВ	скорочення гідрофітів	пожежні збитки

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

Продовження таблиці 2

№ з/п	Тип екосистеми	Основний деградаційний процес	Зміна біомаси / покриву	Геофізичний маркер	Біотичний наслідок	Економіко-екологічний ефект
5	Озерні системи	евтрофікація	прозорість -20%	прогрів води	дефіцит кисню	погіршення туризму
6	Річкові долини	міління русел	стік -10%	руслова нестійкість	втрата нерестовищ	зниження екоресурсів
7	Прибережні лимани	засолення	зсув видового складу	мінералізація води +14%	зміна іхтіофауни	падіння природної продуктивності

Таблиця 3

Зміни біорізноманіття та функціональної стійкості природних заповідників України до 2024 року [4]

№ з/п	Біологічна група / функція	Тренд чисельності	Зміна ареалу	Порушення сезонності	Регіони прояву	Рівень загрози
1	Холодолюбні гірські рослини	спад	звуження	раннє цвітіння	Карпати	високий
2	Степові злаки-домінанти	спад	фрагментація	коротша вегетація	Південь	дуже високий
3	Водно-болотні птахи	нестійкий	зміна маршрутів	коливання гніздування	Полісся, Дунай	високий
4	Амфібії	спад	локальне скорочення	зсув нересту	Лісостеп	високий
5	Запилювачі	спад	мозаїчний	асинхронія з цвітінням	повсюдно	середній
6	Лісові хижі птахи	нестійкий	часткове зміщення	зміна кормових циклів	Полісся, Карпати	середній
7	Іхтіофауна малих водойм	спад	локальне зникнення	тепловий стрес	Степ, Лісостеп	високий

Станом на 2024 рік найбільш уразливими залишаються степові резервати, поліські болотні масиви, малі озерні системи, прибережні лимани та частина гірських біотопів. Для кожного типу територій потрібен окремий набір інструментів. Якщо одна зона потребує повернення води, інша потребує охолодження ландшафту через відновлення рослинного покриву, а третя вимагає оперативного прогнозування зсувів і паводків. Універсальні рішення тут слабко працюють. Першим блоком адаптації має стати постійний екологічний моніторинг кліматичних ризиків. Разові експедиційні спостереження корисні, але вони вже не встигають за темпом змін. Необхідна мережа автоматизованих постів, що фіксують температуру повітря, температуру поверхні ґрунту, вологість, швидкість вітру, кількість опадів, рівень води, електропровідність водного середовища та індекси рослинності. Ці дані мають надходити щодобово, а не раз на сезон [17].

Значної уваги потребує інтеграція польових і цифрових спостережень. Наземний інспектор бачить локальну картину. Супутниковий знімок показує просторовий масштаб. Коли ці масиви об'єднані, адміністрація заповідника отримує інструмент раннього реагування. Для практичного запуску системи дамо структурування пріоритетних рішень за видами спостережень та прогнозним ефектом (табл. 4).

Моніторинг без відновлення середовища не дає повного ефекту. Другий блок адаптації стосується водного режиму, ґрунтового покриву та природної рослинності. Для Полісся першочерговим є часткове перекриття старих меліоративних каналів, створення регульованих водоутримуючих споруд і повернення сезонного затоплення на деградовані площі. У степових заповідниках ефективнішими є заходи проти перегрівання поверхні. Йдеться про відновлення щільного рослинного покриву, контроль інвазійних видів, обмеження витоптування, локальне закріплення еродованих ділянок. Коли збільшується рослинна маса, знижується температура ґрунту, зменшується випаровування, посилюється накопичення органічної речовини [16, с. 489].

У лісових резерватах слід переходити до мозаїчного лісовідновлення з використанням локальних генотипів деревних порід. Одновікові насадження слабше переносять кліматичний стрес. Різновікова структура працює стійкіше. Це видно і за європейським досвідом, і за польовими спостереженнями в Україні. (табл. 5)

Таблиця 4

Пропозиції щодо формування системи моніторингу кліматичних ризиків у природних заповідниках України

№ з/п	Напрям моніторингу	Інструмент реалізації	Частота збору даних	Ключовий показник	Орієнтовний строк запуску	Прогнозний результат до 2030 р.
1	Температурний режим	автоматичні метеостанції	щогодини	середньодобова температура	6 міс.	зниження запізнення рішень на 40%
2	Водний баланс	рівнеміри, свердловини	щоденно	рівень води, РГВ	8 міс.	стабілізація критичних ділянок
3	Пожежний ризик	теплові сенсори, камери	онлайн	індекс сухості	4 міс.	скорочення площ пожеж на 30%
4	Рослинний покрив	супутникові NDVI карти	щотижнево	індекс вегетації	3 міс.	раннє виявлення деградації
5	Ґрунтовий стан	сенсори вологості	щоденно	волога 0–30 см	7 міс.	точне планування відновлення
6	Біорізноманіття	фотопастки, акустичні датчики	постійно	чисельність видів	12 міс.	кращий контроль популяцій
7	Водна якість	портативні лабораторії	щотижнево	кисень, pH, мінералізація	5 міс.	попередження евтрофікації

Таблиця 5

Заходи відновлення водного режиму, ґрунтів і рослинності та очікувані результати

№ з/п	Тип території	Запропонований захід	Екологічний ефект	Геофізичний ефект	Орієнтовні витрати	Прогноз до 2032 р.
1	Поліські болота	блокування дренажних каналів	повернення гідрофітів	підняття РГВ на 0,2–0,5 м	середні	зменшення пожежності
2	Озерні комплекси	регулювання стоку	стабілізація рівнів води	менша сезонна амплітуда	середні	покращення якості води
3	Степові ділянки	підсів автохтонних злаків	ущільнення покриву	менша дефляція	низькі	відновлення біомаси +15%
4	Лісостепові схили	протиерозійні насадження	збереження ґрунтів	зниження змиву	середні	скорочення ерозії на 25%
5	Лісові резервати	різновікове відновлення	вища стійкість лісу	кращий мікроклімат	високі	менше всихання дерев
6	Лиманні системи	керування солоністю водообміну	стабілізація біоти	нижча мінералізація	високі	часткове відновлення іхтіофауни

Окремим напрямом виступає збереження рідкісних і вразливих видів. Тут уже недостатньо охоронного статусу території. Якщо середовище змінюється швидше, ніж вид здатен адаптуватися, потрібні активні програми підтримки. Для рослин це можуть бути мікрорезервати, пересів насіння з локальних популяцій, перенесення репродуктивного матеріалу на придатні ділянки. Для тварин ефективними стають штучні укриття, контроль хижаків на критичних етапах розмноження, підтримка кормових оселищ. У водно-болотних угіддях доцільно створювати сезонні мілководдя для птахів, бо саме нестача таких ділянок часто руйнує гніздовий цикл [7]. У степу корисним є формування мережі тихих зон без туристичного навантаження у період розмноження. Для амфібій вирішальним фактором залишаються тимчасові водойми. Якщо їх немає, популяція швидко слабшає.

Четвертий блок пов’язаний із GIS-технологіями та дистанційним зондуванням. Це вже не додатковий сервіс, а робочий центр управління територією. Просторові моделі створюють можливість бачити теплові острови, зони пересихання, динаміку рослинності, межі пожеж, підтоплення, несанкціоновані втручання. Коли дані надходять у режимі близькому до реального часу, рішення стають точнішими [8, с. 65].

Українські природні заповідники ще зберігають високий запас природної цінності. Але цей запас не безмежний. Саме тому відрізок часу до 2030 року

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

слід розглядати як точку переходу від спостереження за змінами до керованої адаптації екосистем.

Висновки. Кліматичні зміни вже перейшли у таку фазу, коли їхній системний вплив на природні заповідники України стає цілком очевидним. Відбувається трансформація базових параметрів функціонування екосистем. Найпомітніші зміни пов'язані зі зростанням середньорічної температури, збільшенням кількості спекотних днів, порушенням звичного режиму опадів та скороченням періодів, коли природа отримує достатнє зволоження. Найбільшу вразливість виявили степові та прибережні території. Там одночасно посилюються посуха, дефляція ґрунтів, засолення водних систем і деградація рослинного покриву. Не менш загрозливою є ситуація на поліських болотних комплексах. Через падіння рівня ґрунтових вод вони стають дедалі більш пожежонебезпечними. Доцільним видається перехід до адаптивної моделі управління природно-заповідним фондом. Така модель має поєднувати моніторинг, геоінформаційний аналіз, відновлення водного режиму, підтримку рідкісних видів та змішані джерела фінансування природоохоронних програм.

Перспективи використання результатів дослідження. Практична цінність цього дослідження полягає в тому, що запропоновані інструменти можуть безпосередньо використовувати адміністрації заповідників і регіональні органи влади. Найкращих результатів слід очікувати від тієї моделі, де екологічні рішення спираються на стабільне ресурсне забезпечення та достовірні цифрові дані спостережень. Саме таке поєднання створює реальні передумови для довгострокової стійкості екосистем принаймні до 2030 року.

Література

1. Букша І. Ф. Стан оцінювання загроз та адаптаційних заходів у лісовому господарстві України в умовах зміни клімату. Київ, 2022. 31 с. URL: https://www.sfi-ukraine.org.ua/wp-content/uploads/2023/11/buksha_climate-change_report_31-01-2022-ukr.pdf (дата звернення: 21.04.2026).
2. Воєвода В., Совгіра С., Дармофал Е. Вплив змін клімату на біорізноманіття заповідних територій та його наслідки для економіки природоохоронних територій. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. № 6.1 (359). С. 94–98. DOI: https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-359-12
3. Гринь В. В., Босюк А. С. Вплив змін клімату на продуктивність водних екосистем та біоресурси. *Актуальні питання біотехнології, екології та природокористування : матеріали Міжнар. наук. конф., 14-15 травня 2025 р.* Харків. 2025. с. 297-298. URL: https://biotechuniv.edu.ua/wp-content/uploads/2025/06/conf-14-15-05-25-mater.pdf (дата звернення: 20.04.2026).
4. Застосування інструменту ALivE як частини процесу планування екосистемної адаптації до зміни клімату: методологія та визначення точок входу: монографія / Укл.: М. Руда, А. Шибанова, Т. Бойко – Електрон. дан. Київ: Ярочéнко Я. В., 2025. 257 с.
5. Іванюта С. П., Коломієць О. О., Малиновська О. А., Якушенко Л. М. Зміна клімату: наслідки та заходи адаптації: аналіт. доповідь / за ред. С. П. Іванюти. Київ : НІСД, 2020. 110 с. URL: https://niss.gov.ua/sites/default/files/2020-10/dop-climate-final-5_sait.pdf (дата звернення: 21.04.2026).
6. Коніщук В.В., Шумигай І.В., Душко П.М., Мартиненко В.В. Еколого-економічна оцінка трансформації екосистем України за глобальних змін клімату: монографія; за наук. ред. проф. В.В. Коніщука. Київ: ДІА, 2025. 319 с.
7. Македон В. В. Дослідження процесів забезпечення соціальної відповідальності у провідних моделях корпоративного управління. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства: Економічні науки.* 2012. Вип. 126. С. 198–206.
8. Мініна О. О., Дерій Ж. В., Кондратенко Б. В. Глобальні зміни клімату: економічні наслідки та механізм адаптації для України. *Проблеми і перспективи економіки та управління.* 2025. No 1(41). pp. 54-69. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5215-2025-1(41)-54-69
9. Регламент ЄС про відновлення природи та шляхи впровадження в Україні : аналітична записка. *ГО «Ресурсно-аналітичний центр «Суспільство і довкілля».* Березень 2025. URL: https://rac.org.ua/wp-content/uploads/2025/03/racse_eu_nature_restoration_regulation_ukr.pdf (дата звернення: 20.04.2026).
10. Сербов М. Г., Заводній Т. В., Маргітай Л. Г. Вплив змін клімату на водні екосистеми України та адаптаційні стратегії їхнього збереження. *Таврійський науковий вісник. Серія: Екологія, іхтіологія та аквакультура.* 2025. № 143(2). С. 40–46. DOI: https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.143.2.40
11. Сніжко С., Шевченко О., Дідовець Ю. Аналіз впливу кліматичних змін на водні ресурси України. Київ : ГО «Екодія», 2021. 68 с. URL: https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2021/06/analiz_vplyvu_klim_zmin_na_vodni_res_abs.pdf (дата звернення: 20.04.2026).
12. Федонюк В. В. Прояви кліматичних змін на території національного природного парку «Прип'ять – Стохід». *Екологічні науки*. 2025. № 2(59). С. 221–226. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.2-59.34
13. Фурсік О., Жавжарова Т., Скиданюк М., Мар'юк О., Цигрик М., Колішевський Є. Зміна клімату та кліматична адаптація. *Київ : Представництво Фонду ім. Гайнріха Бьолля в Україні,* 2021. 139 с. URL: https://ua.boell.org/sites/default/files/2021-12/Zmina-klimaty-ta-klimatuchna-adaptacia_oputyvannia-UCN.pdf (дата звернення: 22.04.2026).
14. Чорнобров О. Ю. Оцінювання екологічного впливу змін клімату на лісові екосистеми. *Агроекологічний журнал*. 2025. No 4. pp. 45-56. DOI: https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2025.345428
15. Юхименко Ю. С., Данильчук О. В., Бойко Л. І. Вплив кліматичних змін на початок цвітіння деревних рослин у степовій зоні України. *Вісник Одеського національного університету. Біологія.* 2024. Vol. 29. No 2(55). pp. 27-43. DOI: https://doi.org/10.18524/2077-1746.2024.2(55).320487

16. Makedon, V., Politykin, M., Hromyak, S., Novosad, I. and Doronina, I. (2025). The Role of Renewable Energy in Advancing SDG 7: Ensuring Clean and Affordable Energy. *Grassroots Journal of Natural Resources*, 8(2), 485-505. https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.080223
17. Nesa B., Jahan M. S., Hidaka M. Climate Change and Biodiversity: Impacts on Ecosystems and Conservation Strategies. *Nature Physics*. 2026. Vol. 427. No 6970. pp. 145-148.
18. Radomska M. M., Huz V. V., Yarokhmedova I. V. Vulnerability and adaptation of protected areas to climate changes: case study of National Natural Parks in Ukraine. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2022. Vol. 32. No 6. pp. 38-44. DOI: https://doi.org/10.36930/40320606
19. Shahzad A. Climate Change and Its Impact on Global Biodiversity. *Premier Journal of Environmental Science*. 2025. Vol. 3. Art. No 100013. DOI: https://doi.org/10.70389/PJES.100013
20. Skliar V., Sherstiuk M., Shepeliuk M., Kovalchuk N., Matiukha D. Impact of global climate change on the biological characteristics of tree species in forest ecosystems. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science.* 2025. Vol. 16. No 1. pp. 44-63. DOI: https://doi.org/10.31548/forest/1.2025.44
21. Yanitskyi V. Impact of climate change on forest ecosystems in Western Polissia. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*. 2024. Vol. 15. No 1. pp. 100-110. DOI: https://doi.org/10.69628/esbur/1.2024.100

Дата першого надходження статті до видання: 28.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

ЗБЕРЕЖЕННЯ БІОЛОГІЧНОГО ТА ЛАНДШАФТНОГО РІЗНОМАНІТТЯ

УДК 502.75:581.9:502.4(477)
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.18

ЕКОСИСТЕМНІ ПІДХОДИ ДО ЗБЕРЕЖЕННЯ РОСЛИННОГО БІОРІЗНОМАНІТТЯ В МЕРЕЖІ ПРИРОДНО-ЗАПОВІДНОГО ФОНДУ УКРАЇНИ

Любинський О.І.[1], **Пучка О.В.**[1], **Жмурко М.О.**[1], **Якубаш Р.А.**[2]
[1]Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка
вул. Огієнка, 61, 32301, Кам'янець-Подільський
[2]Національний природний парк "Подільські Товтри"
пл. Польський ринок, 6, 32301, Кам'янець-Подільський
lubin.alex@gmail.com, bioldf24.puchka@kpnu.edu.ua,
zhmurko.mike@gmail.com, npptovtry@ukr.net

Стаття присвячена розробці прикладних принципів екосистемного управління рослинним біорізноманіттям заповідних територій України, а також територій міських екосистем. Аналіз охоплює структурні зміни фітоценозів, просторову конфігурацію та функціональну стійкість угруповань. Оцінка здійснюється в умовах комплексного впливу антропогенного навантаження, кліматичних змін та воєнних дій. Методична база інтегрує екосистемний підхід, геоінформаційні технології, біоіндикацію та статистичні методи. Кількісні параметри вразливості, флористичної ерозії, стабільності та відновного потенціалу розраховано за допомогою інтегральних індексів. Емпіричні дані підтверджують критичну вразливість степових, болотних та прибережно-водних угруповань. Окреслені екосистеми зазнають значних втрат видового різноманіття та просторової дезінтеграції. Площа охоронюваних ділянок не гарантує стабільність рослинного покриву. Ключовими детермінантами виступають ступінь фрагментації, стан гідрологічного балансу та інтенсивність зовнішніх навантажень. На основі цих закономірностей запропоновано багаторівневу управлінську модель. Вона об'єднала системний моніторинг, адаптивні механізми реагування та відновлювальні практики з урахуванням типологічних особливостей природнього середовища. Розроблені індикатори та аналітичні моделі створили можливості ідентифікувати пріоритетні ділянки для природоохоронного втручання. Вони сприяють оптимізації управлінських стратегій та підвищенню ефективності збереження біорізноманіття природно-заповідного фонду. Отримані дані доцільно використовувати при розробці регіональних екологічних програм. Їх можна інтегрувати в оновлення кадастрових реєстрів. Результати також підтримують адаптацію національних підходів до європейських стандартів збереження біорізноманіття. Сутність наукової новизни полягає в інтеграції структурних та функціональних параметрів рослинного покриву в єдину аналітичну систему. Виділена інтеграція підвищує точність діагностики стану екосистем. Вона забезпечує обґрунтоване прийняття управлінських рішень. *Ключові слова:* екосистемне управління, рослинне біорізноманіття, природно-заповідний фонд, фітоценози, відновлення екосистем, екологічний моніторинг, ботанічний сад.

Ecosystem approaches to the conservation of plant biodiversity in the network of the nature reserve fund of Ukraine. Liubynskyi O., Puchka O., Zhmurko M., Yakubash R.

The article is devoted to the development of applied principles of ecosystem management of plant biodiversity in protected areas of Ukraine, as well as in urban ecosystem areas. The analysis covers structural changes of phytocenoses, spatial configuration, and functional stability of plant communities. The assessment is conducted under the combined influence of anthropogenic pressure, climate change, and military impacts. The methodological framework integrates the ecosystem approach, geoinformation technologies, bioindication, and statistical methods. Quantitative parameters of vulnerability, floristic erosion, stability, and restoration potential are calculated using integral indices. Empirical evidence confirms the critical vulnerability of steppe, wetland, and coastal-aquatic communities. These ecosystems experience significant losses of species diversity and spatial disintegration. The area of protected sites does not guarantee the stability of vegetation cover. The key determinants are the degree of fragmentation, the condition of the hydrological balance, and the intensity of external pressures. Based on these patterns, a multi-level management model is proposed. It combines systematic monitoring, adaptive response mechanisms, and restoration practices, taking into account the typological features of natural environments. The developed indicators and analytical models enable the identification of priority areas for conservation interventions. They contribute to the optimization of management strategies and enhance the effectiveness of biodiversity conservation within the nature reserve fund. The obtained results are suitable for use in the development of regional environmental programs. They can also be integrated into the updating of cadastral registers. The findings support the adaptation of national approaches to European biodiversity conservation standards. The scientific novelty lies in the integration of structural and functional parameters of vegetation cover into a unified analytical system. This integration improves the accuracy of ecosystem condition diagnostics and ensures well-grounded decision-making in environmental management. *Key words:* ecosystem management, plant biodiversity, nature reserve fund, phytocenoses, ecosystem restoration, environmental monitoring, botanical garden.

© Любинський О.І., Пучка О.В., Жмурко М.О., Якубаш Р.А., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. Функціонування системи збереження рослинного біорізноманіття природно-заповідного фонду України виявляє розрив між формальними режимами охорони та реальними екологічними процесами. Деякі території зберігають природоохоронний статус, однак втрачають внутрішню екосистемну цілісність через фрагментацію, зміни гідрологічного режиму і накопичення порушень рослинного покриву [17]. Проблема полягає в тому, що управління досі орієнтоване на площу, а не на функціонування угруповань. Така ситуація зумовлена відсутністю узгодженої системи оцінювання динаміки фітоценозів. У підсумку деградаційні процеси фіксуються із запізненням.

Актуальність дослідження. Актуальність визначається тим, як рослинне біорізноманіття змінюється під впливом кліматичних і антропогенних чинників. Ці зміни формують нові вимоги до системи природоохоронного управління. Збереження окремих видів уже не гарантує стабільності екосистем. Натомість необхідним стає контроль взаємодії компонентів середовища. Це означає потребу переходу до екосистемного підходу, який враховує структуру угруповань, їх просторову зв'язаність та здатність до самовідновлення. Саме в таких умовах традиційні підходи втрачають ефективність.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Сформований у дослідженні підхід безпосередньо відповідає завданню удосконалення системи управління природно-заповідним фондом. Запропоновані моделі оцінювання і механізми адаптивного управління можуть бути використані під час розроблення регіональних стратегій збереження біорізноманіття, а також у процесі гармонізації з європейськими природоохоронними стандартами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У публікації Андреєва О. Ю. [1] висвітлено результати польових досліджень флористичного різноманіття на окремих ділянках природно-заповідного фонду. Автор доводить, що локальні екосистеми ще зберігають значний видовий потенціал, проте структурна цілісність рослинних угруповань поступово руйнується під впливом зовнішніх чинників. Водночас поза увагою залишилося питання про те, як інтегрувати локальні оцінки в загальнонаціональну систему управління біорізноманіттям. Долішній М. І. [4] розглядає підходи до формування екологічних стратегій на природоохоронних територіях. Основний висновок полягає в тому, що стратегічне планування має ґрунтуватися на поєднанні просторових і функціональних характеристик екосистем. Однак недостатньо вивченими залишаються механізми адаптації цих стратегій до мінливих умов довкілля та зростаючого антропогенного тиску.

Робота Житова О. П. [5] присвячена дослідженню природних оселищ у лісових екосистемах. Автор показує, що навіть за умов охоронного режиму відбувається зміна видового складу та скорочення чисельності окремих груп рослин. Нерозв'язаним залишається питання щодо методів ранньої діагностики деградаційних процесів. У науковій праці Калашнікова А. О. [6] проаналізовано втрати біорізноманіття у лісових масивах. Автори засвідчують, що зниження ресурсної бази супроводжується зміною структури рослинного покриву. Проте кількісне оцінювання цих змін у межах заповідних територій досі не набуло належного розвитку. Кияк В. [7] зробив аналіз вплив кліматичних змін на гірські та рівнинні екосистеми. Отримані дані свідчать, що трансформація середовища спричиняє зміщення ареалів рослинних видів. Водночас поза межами наукового аналізу опинилися підходи до управління цими процесами безпосередньо в межах природоохоронних територій. Мельник-Шамрай В. В. [9] описує стан біорізноманіття лісових екосистем у межах природоохоронного фонду. Автор доходить висновку, що чинні підходи до охорони не враховують динаміки змін рослинних угруповань. Невирішеним залишається питання про впровадження адаптивного управління в практику.

Патрушева Л. І. [11] наводить результати досліджень впливу воєнних дій на природно-заповідний фонд. За її даними, порушення рослинного покриву мають системний характер. Однак механізми відновлення екосистем після таких пошкоджень ще не отримали достатнього наукового обґрунтування. Проданчук М. [19] пропонує підхід до створення банку генетичних ресурсів біорізноманіття. У роботі доведено, що збереження генетичного матеріалу є важливим елементом біобезпеки. Наведений огляд говорить про потребу продовження досліджень спрямованих на розробку інтегрованих екосистемних засад управління збереженням рослинного біорізноманіття природно-заповідного фонду України.

Мета статті – обґрунтувати засади екосистемного управління збереженням рослинного біорізноманіття в межах природно-заповідного фонду України.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. На сьогодні поза увагою залишається розрив між польовими спостереженнями та механізмами прийняття рішень. Дані про зміну видового складу, структури угруповань і просторову ізоляцію накопичуються, однак не трансформуються у конкретні управлінські дії. Причина полягає у відсутності єдиної системи інтерпретації цих показників. Різні джерела інформації не інтегровані між собою, через що частина деградаційних процесів не потрапляє у поле екологічного моніторингу.

Новизна. Сформульований підхід відрізняється орієнтацією на поєднання структурних і функціональних характеристик рослинного покриву в межах єдиної аналітичної системи. Пропонується застосування інтегральних індексів, які відображають не

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

лише стан фітоценозів, але й їх здатність до саморегуляції та відновлення.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічне підґрунтя дослідження спирається на екосистемний підхід, що трактує рослинне біорізноманіття як динамічну функціональну систему. Емпіричну базу утворює поєднання польових спостережень, лабораторно-аналітичних вимірювань та математичного моделювання. Просторова конфігурація природно-заповідних територій досліджена засобами геоінформаційних технологій, що дозволило оцінити кількісні параметри фрагментації та просторової зв'язаності фітоценозів. Стан довкілля аналізували за допомогою біоіндикаційного підходу, який спирається на вивчення видового складу та просторово-часової динаміки видів-індикаторів. Для систематизації даних щодо деградаційних процесів, втрат біорізноманіття та інтенсивності антропогенного впливу взяті методи статистичного узагальнення.

Виклад основного матеріалу. Стан рослинного біорізноманіття в межах природно-заповідного фонду України у 2025 році не можна оцінювати лише через площу охоронюваних територій. Формальна площа ПЗФ показує масштаб природоохоронної мережі, але не розкриває якість рослинного покриву, рівень фрагментації оселищ, втрати рідкісних видів, зміну гідрологічного режиму та тиск воєнних чинників [20 с. 173]. За наявними матеріалами, в Україні налічується 8633 території та об'єкти ПЗФ загальною площею близько 4,5 млн га, однак фрагментація цих територій ускладнює підтримання генетичної різноманітності та міграційних процесів видів. Рослинні угруповання перебувають під одночасним впливом чотирьох груп ризиків: антропогенне навантаження, кліматична нестабільність, воєнні пошкодження, інституційна неповнота охорони. Найбільш уразливими залишаються степові, лучні та болотні комплекси, оскільки вони швидко реагують на зміну вологості, пожежі, розорювання прилеглих земель і порушення екологічних коридорів. Лісові екосистеми мають вищу буферну здатність, але накопичують приховані зміни у складі підліску, трав'яного ярусу та мохового покриву [18, с. 192]. Для оцінки використаємо інтегральний індекс вразливості рослинного біорізноманіття:

$$V_{rb} = \frac{0,30A_n + 0,25D_h + 0,20K_c + 0,15F_a + 0,10I_s}{1} \quad (1)$$

де:

Vrb – інтегральний індекс вразливості рослинного біорізноманіття;

An – індекс антропогенного навантаження;

Dh – частка деградованих і пошкоджених оселищ;

Kc – кліматичний коефіцієнт ризику;

Fa – коефіцієнт фрагментації ареалів;

Is – індекс інституційної слабкості охорони.

Польова логіка оцінювання така: чим більше значення V_{rb}, тим вищий ризик втрати флористичної цілісності. У розрахунках за 2025 рік прийнято шкалу від 0 до 1. Значення понад 0,60 означає високий рівень вразливості, понад 0,70 - критичний рівень.

Перед детальною інтерпретацією потрібно звести основні показники за типами екосистем. Таблиця 1 подає зріз стану рослинного біорізноманіття, який побудований як розрахункове узагальнення на основі наведених у джерелах даних щодо площ ПЗФ, воєнного впливу, деградації природних комплексів і ролі охоронюваних територій.

Таблиця 1 показує, що найбільша площа лісових екосистем не знімає ризику втрати рослинної мозаїки. У лісах змінюється не лише деревостан, а й нижні яруси, де зосереджена висока частка індикаторних видів. Степові екосистеми мають меншу площу, проте вищу вразливість через ізольованість ділянок, пожежі, мінування, розрив природних контурів і низьку здатність до швидкого самовідновлення [21]. Для деталізації втрат рослинного біорізноманіття сформуємо індекс флористичної ерозії:

$$E_f = \frac{(R_0 - R_1) + 0,5(C_0 - C_1) + 0,3(P_0 - P_1)}{R_0 + 0,5C_0 + 0,3P_0} \cdot 100 \quad (2)$$

де:

Ef – індекс флористичної ерозії, %;

R0 – кількість рідкісних видів у базовому стані;

R1 – кількість рідкісних видів після впливу;

C0 – кількість ценотично значущих видів у базовому стані;

C1 – кількість таких видів після впливу;

P0 – проективне покриття природних рослинних угруповань до порушення;

P1 – проективне покриття після порушення.

Розрахунки за цією формулою показують, що найбільша флористична ерозія концентрується у степових, прибережно-водних і болотних угрупованнях. Саме ці екосистеми мають найбільшу кількість вузькоадаптованих видів, залежних від вологості, солоності, мікрорельєфу або відкритості оселища (табл. 2) [15, с. 4].

Дані таблиці 2 показують не площу втрат, а глибину біотичного порушення. Тут степи і болота виходять на перший план. Степова флора втрачає цілісність через розриви між ділянками, а болотна флора реагує на зміну водного режиму майже без часової затримки. У прибережно-водних комплексах погіршення якості води поєднується з механічним руйнуванням берегів.

Воєнний чинник році залишається окремим джерелом ризику. У матеріалах щодо наслідків війни зазначено, що бойові дії торкнулися 40,2% площі природних заповідників, 87,8% біосферних заповідників, 40,8% національних природних парків і 29,3% регіональних ландшафтних парків . В іншому фрагменті наведено дані, що військовими діями охоплено близько 900 об'єктів ПЗФ площею понад 1,24 млн га. Для рослинного біорізноманіття це означає пошко-

Таблиця 1

Оцінка стану рослинного біорізноманіття у ПЗФ України за типами екосистем, на кінець 2025 року (сформовано на основі [10 ,12])

№ з/п	Тип екосистеми	Оріситовна площа в ПЗФ, тис. га	Частка у структурі ПЗФ, %	Типові рослинні утруповання	Рідкісні та індикаторні групи рослин	Деградовані оселища, %	Території з воєнним впливом, %	Ризик втрати видового складу
1	Лісові	1780	39,6	дубові, букові, соснові, вільхові ліси	підсніжник білосніжний, лілія лісова, плауни, орхідні	18,4	31,5	середньо-високий
2	Степові	620	13,8	ковилові, типчаково-ковилові, петрофітні степи	ковила українська, тюльпани, сон чорніючий	38,7	46,2	критичний
3	Лучні	540	12,0	заплавні, суходільні, остепнені луки	зозулинці, тирличі, півники сибірські	29,5	27,8	високий
4	Болотні	310	6,9	сфагнові, осокові, вільшнякові болота	росички, журавлина, сфагнові мохи	34,1	18,6	високий
5	Гірські	470	10,4	субальпійські луки, криволісся, смерекові ліси	едельвейс, рододендрон, тирличі	21,8	8,4	середній
6	Прибережно-водні	430	9,6	очеретяні, лепешнякові, водно-болотні комплекси	сальвінія плаваюча, латаття, водяний горіх	32,6	39,1	високий
7	Петрофітні	350	7,7	гранітні, крейдяні, вапнякові флорокомплекси	ендеміки крейдяних схилів, астрагали	24,3	22,7	середньо-високий

Таблиця 2

Оцінка втрат рослинного біорізноманіття у ПЗФ України, на кінець 2025 року (сформовано на основі [10 ,12])

№ з/п	Тип екосистеми	Рідкісні види до впливу, од.	Рідкісні види зі стабільними популяціями, од.	Втрата рідкісних видів, %	Зменшення проективного покриття, %	Індекс флористичної ерозії, %	Основний чинник втрат	Пріоритет відновлення
1	Лісові	186	149	19,9	12,4	17,6	пожежі, санітарні рубки, всихання	відновлення підліску
2	Степові	142	87	38,7	31,8	36,5	фрагментація, пожежі, мінування	розширення степових ядер
3	Лучні	96	68	29,2	24,6	27,9	заростання, рекреація, випас	мозаїчне косіння

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

Продовження таблиці 2

№ з/п	Тип екосистеми	Рідкісні види до впливу, од.	Рідкісні види зі стабільними популяціями, од.	Втрата рідкісних видів, %	Зменшення проективного покриття, %	Індекс флористичної ерозії, %	Основний чинник втрат	Пріоритет відновлення
4	Болотні	74	48	35,1	38,9	37,4	осушення, потепління, евтрофікація	відновлення гідрорежиму
5	Гірські	118	93	21,2	16,7	19,4	зміщення висотних поясів	моніторинг популяцій
6	Прибережно-водні	82	51	37,8	35,2	36,9	руйнування берегів, забруднення	стабілізація заплав
7	Петрофітні	69	52	24,6	18,3	21,7	рекреація, кар’єри, ерозія	обмеження доступу

дження ґрунтового профілю, занесення важких металів, пожежні сукцесії, мінування ділянок і неможливість повноцінного польового моніторингу [3]. Індекс воєнно-екологічної чутливості фітоценозів розраховується як:

$$W_f = \frac{0,35M_t + 0,25B_s + 0,20F_p + 0,20G_d}{H_r} \quad (3)$$

де:

Wf – індекс воєнно-екологічної чутливості фітоценозів;

Mt – частка замінованих або недоступних територій;

Bs – частка ділянок із пожежними пошкодженнями;

Fp – частка фрагментованих популяцій;

Gd – рівень деградації ґрунтового покриву;

Hr – коефіцієнт природної відновлюваності оселища.

Високе значення W_f стає небезпечним для степових і петрофітних угруповань, оскільки їх відновлення залежить від збереження тонкого шару ґрунту, насіннєвого банку і відкритої структури рослинного покриву. Для лісових систем більшу загрозу становить повторюваність пожеж і порушення природної регенерації деревних порід. Таблиця 3 поєднує оцінку вразливості, здатності до самовідновлення та управлінської пріоритетності.

Таблиця 3 показує, що управлінський пріоритет не завжди збігається з площею екосистеми. Степові території займають меншу частку ПЗФ, але мають найвищий інтегральний ризик. Болотні екосистеми демонструють критичний рівень флористичної ерозії через гідрологічні зміни. Прибережно-водні комплекси мають високу залежність від якості води, стану заплав і режиму берегокористування [16, с. 10]. Гірські екосистеми виглядають стійкішими, але там діє інший механізм ризику, поступове зміщення висотних меж популяцій рідкісних рослин. Оцінка відповідності охоронної системи європейським вимогам також не повинна зводитися до формального включення територій у Смарагдову мережу. У матеріалах НІСД акцентовано потребу супроводу законопроєкту про території Смарагдової мережі, внесення змін до законодавства про ПЗФ, комплексної оцінки екологічних збитків і збільшення частки земель у постійному користуванні установ ПЗФ [12].

У розрізі 2022-2025 років найбільш проблемною залишається не нестача окремих природоохоронних ідей, а слабка зшивка між польовим моніторингом, кадастровими даними, картуванням оселищ і фінансуванням відновлення. Рослинне біорізноманіття потребує не лише охоронного статусу, а й постійного вимірювання: площі угруповань, проективного покриття, чисельності популяцій, частки генеративних особин, появи інвазійних видів, змін фенологічних фаз [14, с. 379]. Саме ці дані дають підставу визначати, де потрібне пасивне збереження, а де потрібне активне втручання.

Екосистемно орієнтоване управління передбачає одночасну роботу з кількома рівнями аналізу. Мова не лише про видове різноманіття, а про структуру угруповань, їхню вертикальну організацію, продукційні показники, стабільність ґрунтового покриву і водний баланс. Але проблема в тому, що ці параметри складно об’єднати у єдину систему управління [8, с. 9]. Кожен із них має власну динаміку, власну чутливість, власний часовий лаг. Інтегральний індекс функціональної стабільності рослинних угруповань визначимо у форматі

$$S_f = \frac{(B_d \cdot W_1) + (P_c \cdot W_2) + (R_s \cdot W_3) + (H_b \cdot W_4) + (L_c \cdot W_5)}{W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5} \quad (4)$$

де:

Sf – інтегральний індекс стабільності фітоценозу;

Bd – біорізноманіття видового складу;

Pc – проективне покриття рослинності;

Таблиця 3

Матриця вразливості рослинного біорізноманіття та пріоритетів охорони у ПЗФ України (кінець 2025 року) (розраховано авторами на основі [10, 13])

№ з/п	Тип екосистеми	V^{rb}	E_f	W_f	Самовідновлення, балів	Ризик інвазійних видів	Доступ-ність моніто-рингу	Пріори-тет охорони	Практична дія
1	Лісові	0,54	17,6	0,48	6,8	середній	часткова	високий	контроль пожеж, охорона старовікових ділянок
2	Степові	0,76	36,5	0,72	3,1	високий	обмежена	критичний	розмінування, створення буферних зон
3	Лучні	0,63	27,9	0,51	5,4	високий	часткова	високий	регульоване косіння, обмеження рекреації
4	Болотні	0,71	37,4	0,44	4,2	середній	складна	критичний	відновлення водного режиму
5	Гірські	0,49	19,4	0,27	6,1	низький	добра	середній	моніторинг висотних меж видів
6	Прибережно-водні	0,69	36,9	0,66	3,9	високий	обмежена	критичний	захист заплав і берегових смуг
7	Петрофітні	0,58	21,7	0,53	4,8	середній	часткова	високий	заборона руйнування схилів

Rs – рівень стійкості до стресових факторів;
Hb – баланс гідрологічного режиму;
Lc – ландшафтна зв'язаність угруповань;
W1…W5 – вагові коефіцієнти значущості.

Цей показник дозволяє оцінити не лише стан рослинності, а її здатність підтримувати внутрішню рівновагу. Виявляється, що угруповання з високим видовим різноманіттям не завжди є стабільними. І навпаки, відносно бідні флористично системи можуть бути стійкішими за рахунок просторової цілісності. Перед переходом до управлінських рішень необхідно деталізувати набір практичних інструментів (табл. 4).

З даних таблиці 4 бачимо, що ефект від управлінських заходів не є одномірним. Він залежить від рівня впровадження, типу екосистеми і часу. Адаптивний менеджмент у цій системі виступає як механізм корекції. Він не додає нових інструментів, але змінює спосіб їх використання. Це пов'язано з тим що природні процеси не мають стабільної динаміки. Вони змінюються під впливом температури, опадів, людської діяльності [2]. Індекс адаптивності управління матиме вигляд:

$$A_f = \frac{\sum_{i=1}^{n}(U_i \cdot D_i \cdot T_i)}{n} \quad (5)$$

де:
Af – рівень адаптивності системи;
Ui – актуальність даних;
Di – швидкість прийняття рішень;
Ti – технологічна забезпеченість.

Чим вищий цей показник, тим швидше система реагує на зміни. Але проблема в тому, що збільшення швидкості реакції часто призводить до зростання витрат. Практичні засади адаптації подано у таблиці 5.

Добре видно, що різні заходи мають різну ефективність. Деякі дають швидкий результат, але супроводжуються високим ризиком. Інші працюють повільніше, але більш стабільно. Відновлення рослинного біорізноманіття після воєнного впливу формує окремий блок управління. Його складність полягає у поєднанні природних і технічних процесів. Ґрунти часто порушені, насіннєвий банк частково втрачений, структура угруповань змінена. Індекс відновлювального потенціалу розраховується як:

$$R_f = \frac{(N_s \cdot 0,35) + (G_r \cdot 0,25) + (B_c \cdot 0,20) + (T_r \cdot 0,20)}{1} \quad (6)$$

де:
Rf – потенціал відновлення;
Ns – стан насіннєвого банку;
Gr – якість ґрунту;
Bc – збереженість біоценозу;
Tr – технології відновлення.

Інструменти перспективного відновлення деталізовано у таблиці 6.

Отже, управління рослинним біорізноманіттям у межах природно-заповідного фонду поступово переходить до моделі, де визначальними стають процеси, а не лише території. Запропоновані механізми показують, що ефективність залежить від поєднання

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

Таблиця 4

Багаторівнева система інтеграції екосистемного підходу в управління рослинним біорізноманіттям ПЗФ України (розроблено авторами)

№ з/п	Рівень управління	Тип екосистеми	Структурні показники	Функціональні показники	Управлінські інструменти	Розрахунковий ефект (ΔS_f)	Вартість реалізації (тис. грн/га)	Часовий лаг, роки	Супутні екологічні ефекти
1	Локальний	степові	щільність травостою, мозаїчність	відновлення насінневого банку	створення мікрорезерватів	+0,18	12,5	3	зменшення ерозії
2	Ландшафтний	лісові	вертикальна структура, підлісок	регенерація підросту	селективне лісівництво	+0,12	9,3	5	стабілізація ґрунтів
3	Регіональний	болотні	площа водного дзеркала	водний баланс	гідрологічна реконструкція	+0,22	18,7	4	зростання біомаси
4	Системний	лучні	флористична насиченість	сезонна продуктивність	регульоване косіння	+0,14	6,1	2	зниження заростання
5	Міжрегіональний	прибережні	берегова лінія	стійкість до підтоплення	укріплення екотонів	+0,19	15,4	3	зменшення втрат видів

Таблиця 5

Комплекс засад адаптивного природоохоронного менеджменту з урахуванням динаміки рослинних угруповань (розроблено авторами)

№ з/п	Тип втручання	Цільова група рослин	Частота застосування	Екологічний ефект	ΔS_f	ΔA_f	Ризик помилки	Технологічна складність
1	біоіндикація	мохи, лишайники	щорічно	рання діагностика змін	+0,07	+0,12	низький	середня
2	дистанційний моніторинг	трав'янисті угруповання	2 рази на рік	контроль площ	+0,05	+0,09	середній	висока
3	локальна реінтродукція	рідкісні види	раз на 3 роки	відновлення популяцій	+0,11	+0,06	високий	висока
4	контроль випасу	лучні види	постійно	стабілізація покриву	+0,09	+0,08	середній	низька
5	регулювання вологості	болотні види	сезонно	підтримка біотопів	+0,13	+0,10	низький	середня

моніторингу, адаптивних рішень і відновлювальних заходів, які синхронізуються між собою.

Висновки. Інтеграція структурних і функціональних індикаторів у єдину аналітичну схему уточнила закономірності формування вразливості рослинних угруповань у різних екосистемних типах. Результати дослідження засвідчують, що ключовими детермінантами стабільності виступають не лише показники видового різноманіття, а й рівень просторової зв'язаності угруповань, гідрологічна збалансованість територій та їхній відновлювальний потенціал. Сформовано теоретичне підґрунтя для подальшого вдосконалення кількісних моделей, призначених для аналізу динаміки рослинного покриву в умовах складної екологічної трансформації.

Система екосистемного управління створює умови для диференційованого розподілу природоохоронних ресурсів у межах природно-заповідного

Таблиця 6

Система відновлення рослинного біорізноманіття з урахуванням структурних і функціональних параметрів екосистем (розроблено авторами)

№ з/п	Тип екосистеми	Ступінь пошкодження	Стратегія відновлення	Технології	Очікуваний результат	ΔR_f	Термін реалізації, роки	Вартість, тис. грн/га	Побічні ефекти
1	степові	високий	реінтродукція	посіви, пересадка	часткове відновлення	+0,21	5	14,2	зміна складу
2	лісові	середній	природна регенерація	мінімальне втручання	стабілізація	+0,12	7	6,8	уповільнення
3	болотні	високий	гідрологічне відновлення	дамби, канали	повернення видів	+0,24	4	19,5	ризик пересихання
4	лучні	середній	контроль заростання	косіння	збереження структури	+0,15	3	5,7	зниження різноманіття
5	прибережні	високий	стабілізація берегів	укріплення	зменшення втрат	+0,18	4	16,3	зміна рельєфу

фонду. Її практична значущість полягає у можливості обґрунтованого визначення пріоритетних ділянок для проведення відновлювальних заходів на основі інтегральних оцінок вразливості та регенераційного потенціалу. Запропонований інструментарій забезпечує методологічну узгодженість між моніторинговими спостереженнями, просторовим плануванням та операційною реалізацією природоохоронних заходів.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати дослідження відкривають перспективи для їхнього впровадження в практику управління природно-заповідним фондом, а також у сферу екологічного планування. Запропоновані індикатори дають змогу визначати пріоритетні території для відновлення рослинних угруповань і для контролю за їхнім станом. Кількісні оцінки забезпечують точнішу інтерпретацію змін біорізноманіття, що є ключовою умовою ефективного прийняття рішень. Отримані результати можуть бути інтегровані в геоінформаційні системи моніторингу, а також у регіональні програми охорони довкілля.

Література

1. Андреєва О. Ю., Марков Ф. Ф., Іванюк Т. М., Кірейцева Г. В. та ін. Різноманіття флори на деяких об'єктах природно-заповідного фонду ДП «Коростенське лісомисливське господарство» Житомирської області. Науковий вісник НЛТУ України. 2022. Т. 32. № 4. С. 12–17. DOI: https://doi.org/10.36930/40320402
2. Відповідність державної політики України у сфері збереження біорізноманіття пріоритетам та цілям Європейського зеленого курсу. Львів : МБО «Екологія-Право-Людина», 2022. 48 с. URL: https://epl.org.ua/wp-content/uploads/2022/02/YEZK_bioriznomanittya_fin.pdf (дата звернення: 29.04.2026).
3. Ґрунтовий покрив України в умовах воєнних дій: стан, виклики, заходи з відновлення: монографія; за ред. С. А. Балюка, А. В. Кучера, М. І. Ромащенка. Київ: Аграрна наука, 2024. 340 с.
4. Долішній М. І., Підгрушний Г. П. Екологічні стратегії охорони біорізноманіття в природоохоронних територіях. Київ: Інститут екології Карпат, 2020. 320 с.
5. Житова О. П., Мороз В. В., Шелюк Ю. С., Багрій Р. А., Мусієнко В. А. Природні оселища і охоронювані види флори та фауни у лісових екосистемах Полісся. Scientific Discussion. 2025. № 101. С. 3-8. ISSN 3041-4245.
6. Калашніков А. О., Жежкун І. М., Торосов А. С. Втрати ресурсів деревини та біорізноманіття лісів України. Лісівництво і агролісомеліорація. 2024. Вип. 145. С. 143-154. DOI: 10.33220/1026-3365.145.2024.143.
7. Кияк В., Данилик І., Шпаківська І., Кагало О., Лобачевська О., Канарський Ю., Марискевич О., Андрєєва О., Кобів Ю., Микітчак Т., Кияк Н., Рабик І. Збереження біорізноманіття у гірських і рівнинних регіонах України в умовах кліматичних змін / за ред. В. Кияк, І. Данилик, І. Шпаківська, О. Кагало, О. Лобачевська. Львів : Левада, 2022. 189 с. URL: https://ecoinst.org.ua/pdf/zberezhennia-bioriznomanittia-monographia-2022.pdf
8. Македон В., Михайленко О., Красніков П. Управління розробкою та реалізацією національних і міжнародних проектів у сфері відновлювальної енергетики. Підприємництво та інновації. 2023. №(26). с. 5-13. https://doi.org/10.32782/2415-3583/26.1.
9. Мельник-Шамрай В. В., Шамрай В. І., Курбет Т. В., Іванюк Р. О., Кагукіна А. М. Збереження біологічного різноманіття на природоохоронних територіях у межах лісових екосистемах. Екологічні науки. 2025. № 4(61). С. 256–263. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.4-61.41

10. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Офіційний вебсайт. URL: https://mepr.gov.ua/ (дата звернення: 29.04.2026).
11. Патрушева Л. І. Природно-заповідний фонд України: наслідки російсько-української війни (2014–2025). Екологічні науки. 2025. № 2(59). С. 165–170. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.2-59.25
12. Пріоритети збереження й відновлення природоохоронних територій і біорізноманіття України. Аналітична записка. Київ : Національний інститут стратегічних досліджень, 2025. URL: https://www.niss.gov.ua/sites/default/files/2025-05/az_bioriznomanittya_ukr_13052025.pdf (дата звернення: 29.04.2026).
13. Реформа системи збереження біорізноманіття: Україна на шляху до ЄС. Львів-Київ : Екологія-Право-Людина, 2025. 56 с. URL: https://epl.org.ua/wp-content/uploads/2025/04/Reforma-systemy-zberezhennya-bioriznomanittya-Ukrayina-na-shlyahu-do-YES.pdf (дата звернення: 29.04.2026).
14. Совгіра С. В., Ємець З. В., Федорчук І. В. Роль заповідних територій у збереженні біорізноманіття: міжнародний та національний досвід. Таврійський науковий вісник. Серія: Екологія, іхтіологія та аквакультура. 2025. № 143. Ч. 2. С. 375–383. DOI: https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.143.2.42
15. Boinot S., Barkaoui K., Mézière D., Lauri P.-E., Sarthou J.-P., Alignier A. Research on agroforestry systems and biodiversity conservation: what can we conclude so far and what should we improve? BMC Ecology and Evolution. 2022. No 22:24. P. 1-6. https://doi.org/10.1186/s12862-022-01977-z
16. García-Vega D., Dumas P., Prudhomme R., Kremen C., Aubert P.-M. A safe agricultural space for biodiversity. Frontiers in Sustainable Food Systems. 2024. Vol. 8:1328800. P. 1-19. https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1328800
17. Hablovskyi B., Hablovska N., Shtohryn L., Kasiyanchuk D., Kononenko M. The Long-Term Prediction of Landslide Processes within the Precarpathian Depression of the Cernivtsi Region of Ukraine. Journal of Ecological Engineering. 2023. №24(7). pp. 254-262. https://doi.org/10.12911/22998993/164753.
18. Makedon V. V., Yarmolenko L. I., Chumak T. V., Zaporozhchenko O. Y. Ensuring the implementation of commercialization strategies for satellite services in the digital economy. Academy Review. 2025. № 2(63). P. 187–203. DOI: https://doi.org/10.32342/3041-2137-2025-2-63-12
19. Prodanchuk M. G., Velychko M. V., Honcharuk Ya. M. Establishment of the national bank of the generofund of biodiversity of Ukraine – an important element of the system of biological safety and biological protection of the state: aspects of management and economy. One Health and Nutrition Problems of Ukraine. 2020. Vol. 53. No. 2. P. 5–16. DOI: https://doi.org/10.33273/2663-9726-2020-53-2-5-16
20. Semenenko O., Ovanesian R., Dobrovolskyi U., Cherep V., Tsarynnyk V. Degradation and restoration of forest ecosystems in the context of war: Environmental and economic challenges to Ukrainian national security. Ukrainian Journal of Forest and Wood Science. 2025. Vol. 16. No. 2. P. 167–191. DOI: https://doi.org/10.31548/forest/2.2025.167
21. Shelyuk Yu. S., Astahova L. Y. Phytoplankton succession in the anthropogenic and climate ecological transformation of freshwater ecosystems. Biosyst. Divers. 2021. №29(2). P. 119-128. https://doi.org/10.15421/012116

Дата першого надходження статті до видання: 30.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК [597.583.1:597-16]:597-1.044(282.247.325.2)
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.19

СУЧАСНА БІОЛОГО-ЕКОЛОГІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА СУДАКА (*SANDER LUCIOPERCA* LINNAEUS, 1758) КАМ'ЯНСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА

Шарамок Т.С., Дорошенко А.В.
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
пр. Науки, 72, 49045, м. Дніпро
sharamok@i.ua, antonio.doroshenko@ gmail.com

Забруднення водного середовища Кам'янського водосховища це комплексна проблема, пов'язана з промисловими стоками, особливо від великих підприємств та комунальними забрудненнями, що призводить до перевищення рибогосподарських норм гідрохімічних показників та специфічних речовин токсичної дії. Зокрема фіксується перевищення нормованих значень за вмістом амонію, нітритами, нафтопродуктами, важкими металами. Аналіз морфофункціональних параметрів судака звичайного (*Sander lucioperca* Linnaeus, 1758) Кам'янського водосховища, зокрема гістоструктури зябер та печінки, розглядається як потенційний індикатор для верифікації екологічного статусу акваторії та інтенсивності техногенного впливу на гідроекосистему. Результати морфофізіологічних досліджень судака звичайного з нижньої ділянки Кам'янського водосховища свідчать, що досліджувані особини мали середню масу 305 г при коефіцієнті вгодованості за Фультоном 1,31. Незважаючи на те, що вміст важких металів у м'язовій тканині судака не перевищував гранично допустимі концентрації для харчової продукції, аналіз внутрішніх органів виявив патоморфологічні зміни. Зокрема, у зябрах риб зафіксовано низку гістопатологій: викривлення, гіперплазію та зрощення ламел, а також десквамацію (відшарування) епітеліальних клітин. Домінуючими деструктивними процесами в печінці виявилися жирова дистрофія та ліпідна вакуолізація, що реєструвалися у 34% та 25% зразків відповідно. Спостерігались також некротичні ділянки в печінці риб, зсув ядра та без'ядерні гепатоцити. Встановлений високий гепатосоматичний індекс у поєднанні з ідентифікованими тканинними аномаліями вказує на інтенсифікацію детоксикаційних процесів в організмі судака як адаптивну відповідь на тривале токсичне навантаження акваторії. Виявлені нами структурні аномалії узгоджуються з морфологічними змінами органів судака у водоймах із високим вмістом важких металів. *Ключові слова:* Кам'янське водосховище, судак звичайний, печінка, зябра, гістопатології, важкі метали.

Modern biological and ecological characteristics of zander (*Sander lucioperca* Linnaeus, 1758) of the Kamianske Reservoir. Sharamok T., Doroshenko A.

The Pollution of the aquatic environment of the Kamianske Reservoir is a complex problem associated with industrial effluents, especially from the large enterprises and municipal pollution, which leads to exceeding the fishery norms of hydrochemical indicators and specific substances of toxic action. In particular, exceeding the normalized values for the content of ammonium, nitrites, petroleum products, and heavy metals is recorded. Analysis of the morphofunctional parameters of the zander (*Sander lucioperca* Linnaeus, 1758) from the Kamianske Reservoir, in particular the histostructure of the gills and liver, is considered as a potential indicator for verifying the ecological status of the water area and the intensity of technogenic impact on the hydroecosystem. The results of morphophysiological analysis of the zander from the lower section of the Kamianske Reservoir indicate that the studied individuals had an average weight of 305 g with a Fulton fattening coefficient of 1.31. Despite the fact that the content of heavy metals in the muscle tissue of the zander did not exceed the maximum permissible concentrations for food products, analysis of internal organs revealed the pathomorphological changes. In particular, a number of histopathologies were recorded in the gills of the fish: curvature, hyperplasia and fusion of lamellae, as well as desquamation (detachment) of epithelial cells. The most destructive processes in the liver were fatty dystrophy and lipid vacuolization, which were recorded in 34% and 25% of samples, respectively. Necrotic areas in the liver of the fish, nuclear displacement and anucleated hepatocytes were also observed. The detected high hepatosomatic index in combination with the identified tissue anomalies indicates the intensification of detoxification processes in the zander organism as an adaptive response to the prolonged toxic load of the water area. The structural anomalies we detected are consistent with morphological changes in the organs of the zander in water bodies with a high content of heavy metals. *Key words:* Kam'yanske reservoir, zander, liver, gills, histopathology, heavy metals.

Постановка проблеми. Основними рибогосподарськими водним об'єктами України є дніпровські водосховища, які мають комплексне призначення, є невід'ємною складовою регіональної господарської інфраструктури та знаходяться під впливом зовнішніх чинників, які переважно чинять негативний вплив на формування структурно-функціональних характеристик іхтіокомплексів [1]. Екологічний стан Кам'янського водосховища визначається низкою факторів, серед яких ключову роль відіграє антропогенне навантаження: промислові та комунальні стоки, з якими надходять забруднюючи речовини [2], воєнні дії спричиняють деградацію стану поверхневих вод через потрапляння залишків військової техніки, озброєння, а також вибухових речовин та продуктів їхньої детонації [3]. Суттєвий вплив має сезонне регулювання стоку, що спричинює зміни гідрологічного режиму, а також вилучення

© Шарамок Т.С., Дорошенко А.В., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

гідробіоресурсів. Окрему групу складають абіотичні фактори: висока інтенсивність водообміну, велика площа мілководь, схильна до заростання макрофітами. Ці чинники можуть значною мірою впливати на умови нересту, ефективність природного відтворення іхтіофауни, специфічних та зхагальних змін в організмі гідробіонтів [1, 4].

Актуальність дослідження. Одним із центрів антропогенного забруднення України є Придніпровський регіон, де промисловість значно впливає на стан навколишнього середовища. Кам'янське водосховище, що розташоване на території промислових зон, перебуває під великим техногенним навантаженням. У сучасних умовах особливої актуальності набуває виявлення біоіндикаторів забруднюючих речовин. Гістопатологічні біомаркери – ефективні показники впливу ксенобіотиків на організм. Завдяки оптимальній швидкості реакції, вони є зручним інструментом для оцінки шкоди від різних забруднювачів навколишнього середовища [5].

Загальна оцінка водного середовища може бути здійсненна за допомогою гістологічного дослідження органів-мішеней риб. Часто використовують особливо чутливі органи, такі як печінка та зябра [6, 7].

Хижі риби, зокрема судак, здатні накопичувати в собі цілий комплекс речовин природного та антропогенного походження, що робить їх об'єктивним біоіндикатором для моніторингу екосистем, зокрема при оцінці показників, що відображають фізіологічний статус організмів та якість водного середовища [8, 9].

Зв'язок авторського доробку з важливими науковими та практичними завданнями. Робота виконана в межах держбюджетної НДР №5-699-26 «Розроблення інтегрованої стратегії відновлення річкових екосистем, що зазнали мілітарних впливів».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У фахових джерелах оприлюднені результати стосовно основних особливостей існування популяцій судака у гідроекосистемах України, розглянуто специфіку його харчування. Виділені ключові проблеми, що перешкоджають стабільному відтворенню популяцій судака у природних умовах та визначені переваги його використання у якості біомеліоратора. Проаналізовано поточний іхтіопатологічний статус виду [10]. Досліджено сучасний стан та специфіку структурно-функціонального формування промислового іхтіоценозу Кам'янського водосховища та встановлено, що серед основних промислових видів останніх років стабільно представлений судак [1]. Проведено комплексний аналіз біологічних показників і стану популяцій судака звичайного, досліджені морфологічні та гістологічні особливості зябер, печінки та крові окуневих риб різних ділянок Запорізького (Дніпровського) водосховища [11, 12]. Представлені результати, щодо впливу воєнних дій, які спричинили витік ксенобіотиків в акваторію Бузького лиману. Здійснено гістологічну оцінку зябер судака в умовах гіпоксії техногенного походження [13].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Ефективне використання водних біоресурсів неможливе без періодичного екологічного моніторингу. При цьому оцінка морфофізіологічних параметрів риб дозволяє оперативно діагностувати стан відповідних екосистем, об'єктивно діагностувати стан організму та виявити деструктивний вплив комплексного антропогенного навантаження на екосистему [14]. Здійснюючи систематичну діагностику органів риб у водоймах, що зазнали антропогенного впливу, можна своєчасно виявити порушення екологічної рівноваги та вжити заходів, щодо профілактики захворювань та збереження іхтіофауни. Печінка виконує в організмі риб досить складну та багатосторонню функцію, головним чином в обміні речовин, а зміни у гістологічній структурі печінки риб у відповідь на дію стресових чинників різного походження можуть проявлятися у вигляді гістопатологій [15, 16]. Зябра риб постійно контактують з водою, тому вони є надзвичайно чутливим органом-мішенню. Зябровий апарат є частиною єдиної системи, яка не лише забезпечує процеси дихання, а й бере участь в іонному обміні та формує процеси адаптації до стресових чинників на тканинному рівні [14, 17]. Незважаючи на те, що проведена значна кількість досліджень щодо гістопатологічних змін органів риб, що знаходяться під впливом широкого діапазону токсикантів органічної і неорганічної природи, таких досліджень поки недостатньо для оцінки стану умов існування риб.

Метою даної роботи було дослідити морфо-функціональні показники судака звичайного Кам'янського водосховища.

Новизна. Сучасний екологічний стан Кам'янського водосховища характеризується як напружений, що зумовлено поєднанням природних факторів та інтенсивного антропогенного навантаження. На теперішній час фіксується перевищення нормованих значень за вмістом амонію, нітритів, нафтопродуктів [2] та важких металів, які є пріоритетними токсикантами водойм Придніпров'я [18-20]. Нами вперше проведено комплексне дослідження морфо-функціональних показників судака звичайного Кам'янського водосховища, зокрема гістологічних особливостей зябер та печінки, котрі можна використовувати для оцінки екологічного стану води та рівня антропогенного навантаження на гідроекосистему.

Матеріали та методи досліджень. Дослідження проводилися на нижній (промисловій) ділянці Кам'янського водосховища поблизу м. Кам'янське (рис. 1).

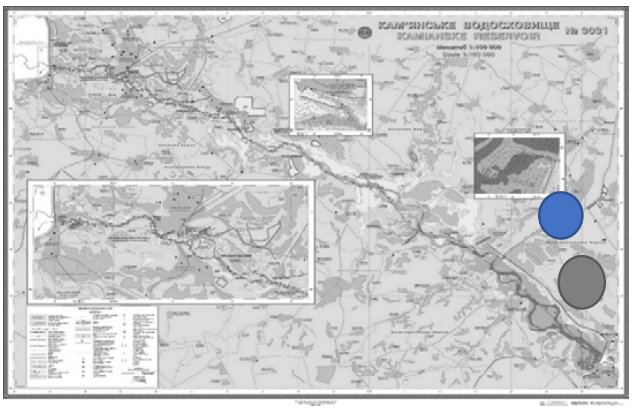


Рис. 1. Схема Кам'янського водосховища [21]

Об'єктом дослідження були особини судака звичайного (*Sander lucioperca* Linnaeus, 1758) обох статей. Матеріал для дослідження збирали під час проведення науково-дослідних ловів в серпні-вересні 2025 р. за допомогою зябрових сіток. Біологічний аналіз риб проводили класичними методами [22]. Визначення індексів органів здійснювали прирівнюючи масу органів до маси тіла риби, коефіцієнт вгодованості за Фультоном (Кв).

Гістологічний аналіз зябер та печінки здійснювали відповідно до загальноприйнятих методик. Для отримання гістологічних препаратів готували парафінові блоки, зрізи робили за допомогою мікротома та забарвлювали гематоксилін-еозином. Препарати досліджували за допомогою бінокулярного мікроскопа Ulab XY-B2TLED при збільшені 400х та 100х. Мікрофотографії робили, застосовуючи цифрову фотокамеру «Sigeta – FMA050», під'єднану до мікроскопа.

Концентрацію важких металів в м'язах риб визначали на атомно-абсорбційному спектрофотометрі «С115-М1» в мг/кг. Статистичну обробку даних здійснювали за допомогою програми «Microsoft Excel 2010»

Результати досліджень. В період проведення дослідження частка судака в уловах на промисловій ділянці Кам'янського водосховища складала 5%. Вікова структура популяції судака охоплювала сім вікових груп. Основу якої (до 80%) складали особини віком 3–4 роки. Натомість старші вікові групи (7–8 років і більше) траплялися в уловах епізодично, а їхній сумарний обсяг не перевищував 3%.

Відомо, що темпи лінійного та вагового росту особин одного виду детермінуються комплексом факторів: трофічним потенціалом водойми (якістю та доступністю корму), об'ємом водного простору, а також сукупністю гідробіологічних і фізико-хімічних параметрів середовища. Порівняльний аналіз розмірно-вагових показників одновікових особин судака звичайного водойм Придніпров'я показав, що маса риб Кам'янського водосховища була меншою порівняно з рибами нижньої ділянки Запорізького (Дніпровського) водосховища на 12% та вищою порівняно з рибами р. Самара на 59% ($p<0,05$). Достовірних відмінностей між іншими морфометричними ознаками та значенням Кв не виявлено (табл. 1).

Індекси внутрішніх органів риб є важливими показниками, які широко застосовуються у сучасній гідроекології та дозволяють оцінити фізіологічний стан, рівень живлення, репродуктивну активність, а також реакцію організму на зовнішні стресори, зокрема забруднення довкілля [23]. Встановлено, що гепатосоматичний індекс у судака Кам'янського водосховища перевищував даний показник у риб Запорізького (Дніпровського) водосховища на 31% [24]. Збільшення розмірів печінки можна розглядати як адаптацію, що зумовлена інтенсифікацією детоксикаційних процесів в організмі риб унаслідок тривалого техногенного навантаження на акваторію. Показники індекса серця судака Кам'янського водосховища достовірно не відрізнялись у одновікових риб інших водойм Дніпропетровської області.

Токсикологічний аналіз м'язів судака не виявив перевищення вмісту важких металів для риби як продукту харчування (табл. 2).

Порівняно з іншими водоймами регіону, судак Кам'янського водосховища накопичував найбільше заліза (в 1,3 – 1,9 разів), цинку – в 1,4 – 3 рази та марганцю – в 1,4 – 4 рази.

На гістологічних препаратах зябер судака видні зяброві пелюстки (первинні ламели), що відходять від центральної осі. Від первинних ламед перпендикулярно відходять численні вторинні ламели, які є основним місцем газообміну. Усередині вторинних ламел розташована мережа капілярів, що забезпечує велику площу поверхні для газообміну. Вторинні ламели покриває зябровий епітелій.

В зябрах судака Кам'янського водосховища спостерігається ряд гістопатолой: викривлення ламел,

Таблиця 1

Морфо-фізіологічні показники судака звичайного Кам'янського водосховища, M±m, n=15

Показники / Ділянки	L, см	l, см	M, г	Кв	Індекс печінки	Індекс серця
Нижня ділянка Камя'нського водосховища	32,9±4,4	28,5±3,8	305,0± 77,6	1,31±0,4	1,21± 0,31	0,12± 0,02

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

Таблиця 2

Вміст важких металів в м'язах судака звичайного Кам'янського водосховища, мг/кг, M±m, n=5

Показники / Ділянки	Fe	Zn	Cu	Mn	Pb	Cd
Нижня ділянка Кам'янського водосховища	13,63± 3,1	13,01± 2,2	0,19± 0,02	0,5±0,03	0,78± 0,06	0,04± 0,001

розростання (гіперплазія) покривного епітелію ламел, зрощення ламел, що є наслідком гіперплазії, яке призводить до значного зменшення площі поверхні для дихання. У деяких ділянках епітеліальні клітини відшаровуються від базальної мембрани (рис. 2). Це може бути ознакою набряку ламел.

Аналіз гістологічної структури печінки судака Кам'янського водосховища дозволить об'єктивно оцінити їхній фізіологічний статус у контексті екологічного навантаження. Дослідження виявили деструктивні зміни в паренхімі органа: дегенерацію гепатоцитів (ліпідну вакуолізацію та жирову дистрофію), зміщення та втрату ядер, а також осередки некрозу (рис. 3).

Серед виявлених гістопатологій печінки риб Кам'янського водосховища найчастіше зустрічались ліпідна вакуолізація (25% проб) та жирова дистрофія (34%). Розвиток жирової дистрофії та ліпідної вакуолізації гепатоцитів у риб є критичним індикатором трофічного дисбалансу або хронічної інтоксикації середовища. Інтенсивна акумуляція ліпідів ініціює низку патологічних змін: пригнічення антиоксидантних систем, зростання сприйнятливості до бактеріальних хвороб та дезорганізацію білково-ліпідного метаболізму. У важких випадках жирова дистрофія переходить у некроз тканин печінки, що може спричинити загибель риб. Патологічні зміни в печінці риб за умов дії

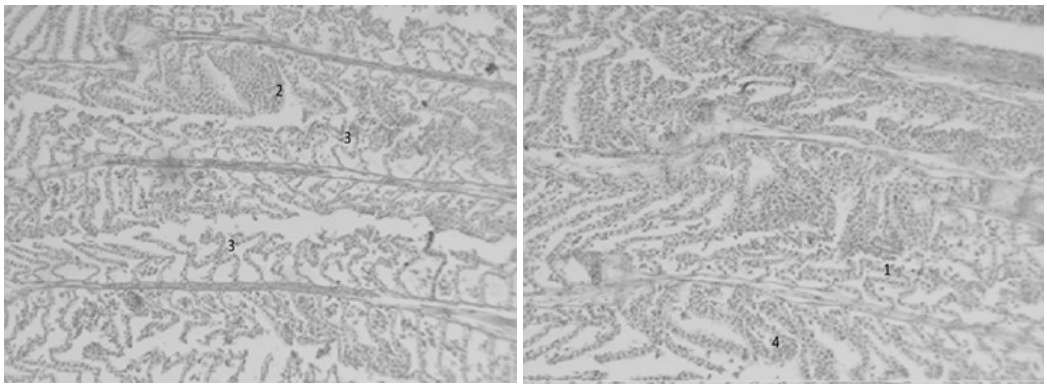


Рис. 2. Гістоструктура зябер судака Кам'янського водосховища: 1- викревлення ламел; 2 – гіперплазія епітелію; 3 – відшарування епітелію ламел; 4 – зрощення ламел

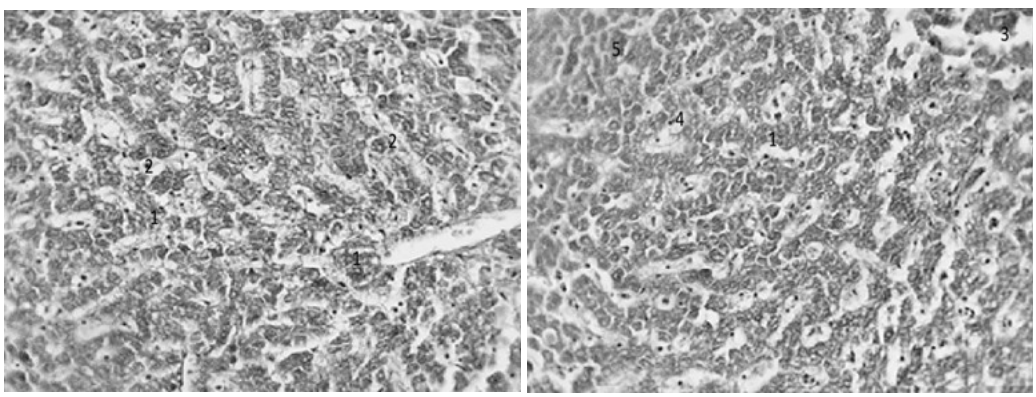


Рис. 3. Гістоструктура печінки судака Кам'янського водосховища: 1 – ліпідна вакуолізація гепатоцитів; 2 – жирова дистрофія; 3 – некроз; 4 – зсув ядра; 5 – без'ядерні гепатоцити

токсичного забруднення можуть розвиватися впродовж тривалого часу.

Зафіксовані гістопатологічні зміни печінки та зябрового апарату судака вказують на пролонговану токсичну дію мультикомпонентного забруднення середовища [25]. Ідентифіковані нами порушення корелюють із патоморфологічними показниками окуневих риб із акваторій із високим рівнем вмісту важких металів, що підтверджує системний характер техногенного впливу на організм гідробіонтів [12].

Висновки. 1. Встановлено, що концентрація важких металів у м'язах судака звичайного Кам'янського водосховища не перевищувала встановлених гранично допустимих концентрацій для рибної сировини, що підтверджує безпечність досліджених особин як харчового продукту.

2. Морфо-фізіологічний аналіз судака звичайного Кам'янського водосховища показав, що середня маса досліджуваних особин складала 305 г, коефіцієнт вгодованості за Фультоном 1,31. Виявлений високий гепатосоматичний індекс може вказувати на інтенсифікацію детоксикаційних процесів в організмі риб унаслідок тривалого токсичного навантаження.

3. Превалюючими гістопатологічними змінами печінки риб Кам'янського водосховища були ліпідна вакуолізація та жирова дистрофія, що складало 25% та 34% досліджуваних зразків відповідно що є маркерами метаболічних порушень та проявом хронічного токсикозу.

4. В зябрах судака спостерігається ряд гістопатолой: викривлення ламел, розростання (гіперплазія) покривного епітелію ламел, зрощення ламел та відшарування епітеліальних клітин, що негативно впливає на газообмін і загальний гомеостаз організму.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати дослідження доцільно використовувати як допоміжний критерій під час екологічного моніторингу водойм. Аналіз тканин судака дає змогу об'єктивно оцінити рівень техногенного навантаження та загальний стан гідроекосистеми в умовах тривалого впливу зовнішніх чинників.

Література

1. Peculiarities of the current structural and functional organization of the commercial ichthyocenosis of Kamianske Reservoir / I. Buzevych et al. Ribogospodars′ka nauka Ukraïni. 2025. № 2(72). P. 51–74. URL: https://doi.org/10.61976/fsu2025.02.051
2. Екологічний паспорт Дніпропетровської області за 2023 р. Дніпро, 2024. 316 с. https://adm.dp.gov.ua/pro-oblast/ekologiya-pro-oblast/ekologiya.
3. The impact of military actions on water quality in rivers of Ukraine / A. D. Kuzyk et al. *Bulletin of Lviv State University of Life Safety*. 2024. № 30. С. 26–34. URL: https://doi.org/10.32447/20784643.30.2024.03.
4. 1. Nazarov A., Borisenko A. Current state of commerical ichthyofauna of the Dniprodzerzhinsk reservoir. *Ribogospodars'ka nauka Ukraïni*. 2013. № 4(26). P. 38–49. URL: https://doi.org/10.15407/fsu2013.04.038.
5. Lujić J., Marinović Z., Miljanović B. Histological analysis of fish gills as an indicator of water pollution in the Tamiš River. *Acta Agriculturae Serbica*. 2013. Vol. XVIII, № 36. P. 133–141.
6. Kurchenko V., Sharamok T., Marenkov O. The histological structure of gills and kidneys of the prussian carp from Zaporizhian (Dnipro) reservoir. *Scientific Issue Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University*. 2021. Vol. 81(1–2). P. 53–58. (Series : Biology). DOI:10.25128/2078-2357.21.1-2.7
7. Машкова К. А., Шарамок Т. С. Особливості гістологічної структури печінки карася сріблястого річки Самара (Дніпропетровська область). *Український журнал природничих наук*. 2023. № 4. С. 31–39. https://doi.org/10.32782/naturaljournal.4.2023.4
8. Федоненко О. В., Ананьєва Т. В. Еколого-біохімічні показники тканин та органів основних видів хижих риб Запорізького водосховища. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2011. Т. 1 (22). С. 184-191.
9. Причепа М. В. Вплив антропогенного забруднення водойм на морфо-фізіологічні та біохімічні показники окуня (*Perca fluviatilis* linnaeus, 1758) в різні сезони року. *Ribogospodars'ka nauka Ukraïni.* 2019. № 2(48). С. 52–66. DOI: 10.15407/fsu2019.02.052
10. Поліщук О.М., Симон М.Ю. Біологічні особливості судака (*Sander lucioperca* Linnaeus, 1758) як представника аборигенної іхтіофауни україни (Огляд). *Ribogospodars'ka nauka Ukraïni.* 2023. № 2(64). С. 141–164. DOI: https://doi.org/10.15407/fsu2023.02.141
11. Маренков О. М., Нестеренко О. С., Боровик І. І. Оцінка промислових запасів і прогноз вилову риб родини ялецеві (Leuciscidae) Дніпровського водосховища на 2026 рік. *Ribogospodars'ka nauka Ukraïni.* 2025. № 3(73). С. 57–88. DOI: https://doi.org/10.61976/fsu2025.03.057
12. Корженевська П.О., Шарамок Т.С., Дорошенко А.В. Зміни у гістологічній структурі тканин та органів судака звичайного (*Sander lucioperca* Linnaeus, 1758) та окуня звичайного (*Perca fluviatilis* Linnaeus, 1758) Запорізького водосховища під впливом антропогенного навантаження. *Ribogospodars'ka nauka Ukraïni.*. 2024. № 4(70). С. 165–185. DOI: https://doi.org/10.61976/fsu2024.04.165
13. Козій О. М. Гістологічні зміни зябер судака (*Sander lucioperca* Linnaeus, 1782) в умовах гіпоксії як наслідку техногенного навантаження, зумовленого повномасштабною війною. *Ribogospodars'ka nauka Ukraïni.* 2025. № 1(71). С. 121-136. DOI: https://doi.org/10.61976/fsu2025.01.121
14. Жиденко А. О., Бібчук К. В., Паперник В. В. Чутливість та стійкість коропових риб до дії гербіцидів (огляд). *Гідробіологічний журнал*. 2019. № 5 (55). С. 98-112. http://nbuv.gov.ua/UJRN/gbj_2019_55_5_10
15. Шарамок Т.С., Курченко В.О., Колесник Н.Л. Гістоморфометрична структура гепатопанкреасу деяких коропових риб (*Cyprinidae rafinesque*, 1810) Запорізького водосховища. *Рибогосподарська наука України*. 2017. № 4. С. 75–84. DOI: https://doi.org/10.15407/fsu2017.04.075

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

16. Changes in the metabolic processes, cytomorphology, and histology of the fish Carassius gibelio exposed to 2,4,6-trinitrotoluene / N. O. Khromykh et al. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. 2025. Vol. 16, № 3. P. e25106. URL: https://doi.org/10.15421/0225106
17. Hued A. C., Oberhofer S., de los Ángeles Bistoni M. Exposure to a Commercial Glyphosate Formulation (Roundup®) Alters Normal Gill and Liver Histology and Affects Male Sexual Activity of Jenynsia multidentata (Anablepidae, Cyprinodontiformes). *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 2011. Vol. 62, № 1. P. 107–117. URL: https://doi.org/10.1007/s00244-011-9686-7
18. Hydroecological assessment of the Zaporizhzhia reservoir / T. Sharamok et al. *Problems of bioindications and ecology*. 2019. Vol. 24, № 2. P. 137–149. URL: https://doi.org/10.26661/2312-2056/2019-24/2-12.
19. The hydroecological characteristics of current state of the Zaporizhzhia (Dnipro) reservoir and its tributaries / N. Yesipova et al. *Ribogospodars'ka nauka Ukraïni.* 2023. № 4(66). P. 35–48. URL: https://doi.org/10.61976/fsu2023.04.035
20. Шарамок Т.С., Чорна О.Ю. Вміст важких металів в екосистемі Кам'янського водосховища. *Екологічні проблеми навколишнього середовища та раціонального природокористування в контексті сталого розвитку.* Матеріали IV Міжнароднародної науково-практичної конференції, Херсон, 21–22 жовтня 2021 р., 2021. С. 393–394.
21. Кам'янське водосховище від Кременчуцької ГЕС до Середньодніпровської ГЕС та гирлової частини річки Ворскла: вебсайт. URL: https://hydro.gov.ua/?p=3235
22. Методи гідроекологічних досліджень поверхневих вод / за ред. Романенко В. Д., Київ : ЛОГОС, 2006. 408 с.
23. Widianty L, Soedibya P. H. T., Marnani S. The Morphological-Anatomical Index Profile Of Tilapia (*Oreochromis niloticus*) Cultivated In The Mina Padi Pond System. *Journal of Artha Biological Engineering.* 2023. Vol. 1. № 1 (17–28). DOI:10.62521/4w8bex38
24. Дорошенко А. В., Шарамок Т. С., Корженевська П. О. Морфофізіологічні показники хижих риб водойм Придніпров'я. *Сучасні проблеми раціонального використання водних біоресурсів*. Зб. матеріалів VII Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 30–31 жовтня 2025 р., Київ. 2025. С. 252–254.
25. Дудник С.В., Євтушенко М.Ю. Водна токсикологія: основні теоретичні положення та їхнє практичне застосування [Монографія] К.: Вид-во Українського фітосоціологічного центру. 2013. 297 с. https://doi.org/10.61976/conf.if-2025-7

Дата першого надходження статті до видання: 24.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 577.121:581.142:613.26
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.20

ЕКОЛОГО-БІОХІМІЧНА СТІЙКІСТЬ НАСІННЄВОГО МАТЕРІАЛУ ЯК ФАКТОР ФОРМУВАННЯ ЯКОСТІ АГРОПРОДУКЦІЇ ТА ПІДТРИМКИ ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ

Боброва М.С.[1], **Дефорж Г.В.**[1], **Мирза-Сіденко В.М.**[1], **Найдьонова Г.Г.**[1], **Ларичева О.М.**[2], **Цвях О.О.**[3]
[1]Центральноукраїнський державний університет імені Володимира Винниченка
вул. Шевченка, 1, 25000, м. Кропивницький
[2]Чорноморський національний університет імені Петра Могили
вул. 68 Десантників, 10, 54000, м. Миколаїв
[3]Навчально-науковий педагогічний інститут імені В.О.Сухомлинського
Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова
пр. Героїв України, 9, 54007, м. Миколаїв
kazna4eeva@gmail.com, deforzhav@gmail.com, vmirzasidenko@gmail.com,
galinkaussn@gmail.com, laricheva72@gmail.com, tsvyakho@gmail.com

У статті представлено результати комплексного дослідження впливу температурного стресу (гіпотермії) на посівну придатність та стан прооксидантно-антиоксидантної системи насіння кукурудзи та гороху. Актуальність роботи зумовлена необхідністю зміцнення продовольчої безпеки та інтенсифікації агровиробництва України шляхом використання високоякісного насіннєвого матеріалу, здатного адаптуватися до змін клімату. Авторами обґрунтовано, що біохімічне здоров'я насіння є первинною ланкою у формуванні якості агропродукції, що безпосередньо корелює із повноцінним харчуванням та здоров'ям людини. Встановлено, що гіпотермія діє як потужний абіотичний стресор, що ініціює накопичення активних форм оксигену та продуктів перекисного окиснення ліпідів, зокрема ТБК-активних продуктів, що призводить до вільнорадикального пошкодження мембран. У роботі вперше проведено міжсортове та міжвидове порівняння адаптивного потенціалу однодольних (кукурудза) та дводольних (горох) культур. Доведено, що стійкі сорти (горох «Саксон», кукурудза «Джоді») характеризуються потужнішим антиоксидантним «буфером», здатним швидко ініціювати синтез ферментів (СОД, каталази) та накопичення низькомолекулярних антиоксидантів (аскорбінової кислоти, глутатіону) у відповідь на охолодження. Натомість малостійкі сорти демонструють повільну реакцію антиоксидантного захисту, що призводить до значного зниження енергії проростання та схожості. Наукова новизна дослідження полягає у верифікації біохімічних параметрів прооксидантно-антиоксидантної системи як інформативних маркерів для раннього прогнозування життєздатності рослин. Методологічне значення роботи визначається обґрунтуванням підходу до оцінки якості насіння, що базується на аналізі активності цитохромоксидази та динаміки оксидативного стресу. Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості їх впровадження в діяльність селекційних центрів та агропідприємств для оптимізації передпосівної підготовки та раціонального вибору холодостійких сортів. Отримані дані поглиблюють розуміння молекулярних механізмів екологічної адаптації рослин та створюють підґрунтя для розробки інноваційних систем моніторингу екологічної безпеки агроценозів. *Ключові слова:* біохімія, екологія, антиоксиданти, прооксиданти, здоров'я людини, гіпотермія, онтогенез, рослини.

Eco-biochemical stability of seed material as a factor in shaping agricultural product quality and supporting human health. Bobrova M., Deforzh H., Myrza-Sidenko V., Naidonova H., Larycheva O., Tsviakh O.

The article presents the results of a comprehensive study on the impact of temperature stress (hypothermia) on the sowing quality and the state of the prooxidant-antioxidant system in maize and pea seeds. The relevance of the work is driven by the need to strengthen food security and intensify agricultural production in Ukraine through the use of high-quality seed material capable of adapting to climate change. The authors substantiate that the biochemical health of seeds is the primary link in shaping the quality of agricultural products, which directly correlates with adequate nutrition and human health. It was established that hypothermia acts as a powerful abiotic stressor, initiating the accumulation of reactive oxygen species and lipid peroxidation products, particularly TBA-active products, leading to free radical membrane damage. For the first time, the study conducts an inter-varietal and inter-species comparison of the adaptive potential of monocotyledonous (maize) and dicotyledonous (pea) crops. It is proven that resistant varieties (pea "Saxon", maize "Jody") are characterized by a more robust antioxidant "buffer" capable of rapidly initiating the synthesis of enzymes (SOD, catalase) and the accumulation of low-molecular-weight antioxidants (ascorbic acid, glutathione) in response to cooling. Conversely, low-resistance varieties demonstrate a slow antioxidant defense response, leading to a significant decrease in germination energy and laboratory germination rates. The scientific novelty of the research lies in the verification of biochemical prooxidant-antioxidant system

© Боброва М.С., Дефорж Г.В., Мирза-Сіденко В.М., Найдьонова Г.Г., Ларичева О.М., Цвях О.О., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

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

parameters as informative markers for early prediction of plant viability. The methodological significance of the work is defined by the substantiation of an approach to seed quality assessment based on the analysis of cytochrome oxidase activity and the dynamics of oxidative stress. The practical significance of the results consists in the possibility of their implementation in the activities of breeding centers and agricultural enterprises to optimize pre-sowing seed preparation and ensure the rational selection of cold-resistant varieties. The obtained data deepen the understanding of the molecular mechanisms of ecological adaptation in plants and create a foundation for developing innovative systems for monitoring the environmental safety of agroecosystems. *Key words:* biochemistry, ecology, antioxidants, prooxidants, human health, hypothermia, ontogenesis, plants.

Постановка проблеми. Одним із головних викликів для сільськогосподарського виробництва є вплив несприятливих температурних умов (гіпотермії) на початкових етапах проростання насіння, що призводить до зниження його енергії проростання та загальної схожості. Проблема полягає у необхідності глибшого вивчення прооксидантно-антиоксидантної системи (ПАС) тканин насіння як ключового чинника формування стресостійкості. Існує потреба у встановленні чіткого взаємозв'язку між біохімічними показниками стану ПАС та посівною придатністю для того, щоб використовувати ці дані як інформативні маркери життєздатності. Пошук ефективних методів раннього виявлення слабкого або пошкодженого насіннєвого матеріалу залишається важливим науково-практичним завданням для підвищення біологічної та технологічної ефективності рослинництва.

Враховуючи наведені фактори, ***метою дослідження*** стало**:** встановити взаємозв'язок між біохімічними показниками стану ПАС насіння та його посівною придатністю для підвищення якості оцінювання насіннєвого матеріалу й прогнозування стійкості рослин до стресових чинників.

Реалізація мети дослідження передбачала необхідність виконання таких ***завдань***:

1) визначити посівну придатність насіння та значення показників стану ПАС тканин насіння різних сортів рослин у контрольних умовах**;**

2) визначити зміни посівної придатності насіння та значення показників стану ПАС тканин насіння різних сортів рослин в умовах впливу гіпотермії;

3) здійснити міжсортове порівняння значень дослідних показників;

4) визначити залежність посівної придатності від біохімічних показників стану ПАС та рівня стійкості сорту

5) встановити біохімічні та фізіологічні особливості насіннєвого матеріалу, які можуть слугувати інформативними маркерами його життєздатності та стійкості до стресових чинників

Актуальність дослідження зумовлена сучасними викликами, перед якими постає аграрний сектор України, а також значенням країни на світовому ринку продовольства. Україна традиційно займає провідні позиції серед держав-виробників зернових культур та іншої агропродукції. Попри умови повномасштабної війни, вітчизняне сільське господарство продовжує відігравати ключову роль у забезпеченні продовольчої безпеки та збереженні експортного потенціалу. Це підсилює необхідність інтенсифікації агровиробництва, оптимізації використання посівних площ і стабільного отримання високих врожаїв, що набуває не лише економічного, а й стратегічного значення для країни. Одним із головних факторів успішності землеробства є якісне насіння, адже оцінка його посівної придатності дає можливість своєчасно коригувати агротехнічні підходи, знижувати витрати та підвищувати ефективність виробництва. Поглиблений біохімічний аналіз показників ПАС дозволяє краще зрозуміти молекулярні механізми стійкості рослин до стресових чинників і є важливою передумовою для створення більш адаптованих сортів.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Представлене дослідження є безпосереднім внеском у розв'язання фундаментального наукового завдання щодо розкриття молекулярних механізмів адаптації рослин до несприятливих чинників довкілля. Авторський доробок пов'язаний із пріоритетними напрямами розвитку біологічних наук, зокрема фізіології та біохімії рослин, через встановлення ролі ПАС як ключового регулятора життєздатності насіння. У практичній площині робота корелює із завданнями державної важливості щодо зміцнення продовольчої безпеки України та підвищення конкурентоспроможності вітчизняного агропродукту на світовому ринку. Розроблені підходи до використання біохімічних параметрів (активності супероксиддисмутази, каталази та вмісту продуктів перекисного окиснення макромолекул) як інформативних маркерів дозволяють прогнозувати стійкість сортів до гіпотермії на ранніх етапах. Це забезпечує наукове підґрунтя для оптимізації передпосівної обробки насіння, раціонального вибору посівного матеріалу для різних кліматичних зон та зниження економічних втрат агропідприємств через вплив несприятливих погодних умов. Таким чином, результати дослідження мають пряме впровадження у діяльність селекційних центрів та сільськогосподарських установ для підвищення технологічної ефективності рослинництва.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивченню механізмів адаптації рослин до несприятливих чинників довкілля присвячено значну кіль-

кість сучасних наукових праць [1-4], де особлива увага приділяється ролі активних форм оксигену (АФО) та ефективності антиоксидантного захисту [6-9, 11-13]. Дослідниками встановлено, що супероксиддисмутаза (СОД) є стабільним біохімічним маркером толерантності до абіотичного стресу у вищих рослин [6, 7]. Важливе значення у наукових публікаціях останніх років надається вивченню глутатіону та аскорбінової кислоти як ключових компонентів неферментативної ланки, що забезпечують фізіологічну стійкість організму [8, 13]. Також у сучасній літературі детально описано процеси перекисного окиснення ліпідів та накопичення ТБК-активних продуктів як маркерів оксидативного пошкодження мембран під впливом екстремальних температур [10, 14]. Проте, попри наявність ґрунтовних розробок щодо окремих біохімічних показників, питання комплексного взаємозв'язку між динамікою прооксидантно-антиоксидантного балансу та посівною придатністю насіння різних сортів в умовах гіпотермії потребує подальшого поглибленого аналізу.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Недостатньо вивченим залишається питання прямої кореляції між початковим станом ПАС насіння та його фактичною здатністю до проростання після короткочасного впливу низьких температур. Досі бракувало порівняльних даних щодо того, як саме специфіка метаболізму однодольних (кукурудза) та дводольних (горох) культур визначає ефективність їхнього антиоксидантного «буфера» при переході від стану спокою до активного онтогенезу в умовах гіпотермії. Також потребує уточнення роль окремих компонентів ПАС, зокрема активності цитохромоксидази та динаміки низькомолекулярних антиоксидантів, як діагностичних маркерів, що дозволяють заздалегідь прогнозувати рівень вільнорадикального пошкодження мембран у сортів із різним ступенем генетично зумовленої стійкості. Саме на комплексному аналізі цих взаємозв'язків та верифікації біохімічних індикаторів життєздатності зосереджена дана стаття.

Наукова новизна дослідження. Наукова новизна одержаних результатів полягає у встановленні комплексного взаємозв'язку між біохімічними параметрами ПАС та показниками посівної придатності насіння в умовах температурного стресу. У роботі вперше продемонстровано можливість використання профілю ПАС, зокрема співвідношення активності СОД та рівня генерації супероксиданіонрадикалу, як інструменту для точного прогнозування адаптаційного потенціалу однодольних і дводольних рослин на ранніх етапах онтогенезу. Виявлено специфічні міжсортові особливості реагування антиоксидантного «буфера», що дозволяє диференціювати сорти за рівнем їхньої генетично зумовленої холодостійкості на основі динаміки низькомолекулярних антиоксидантів та активності цитохромоксидази.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічне значення роботи полягає в обґрунтуванні та верифікації біохімічного підходу до оцінки якості насіннєвого матеріалу, який базується на аналізі маркерів оксидативного стресу та ферментативного захисту. Загальнонаукове значення дослідження полягає у поглибленні теоретичних уявлень про молекулярні механізми стрес-фізіології рослин та функціонування ПАС як універсальної системи підтримки гомеостазу при переході насіння від стану спокою до проростання. Встановлена прямопропорційна залежність між функціональним станом антиоксидантної (АО) системи та життєздатністю організму створює наукове підґрунтя для розробки нових методів біохімічної діагностики у галузі рослинництва, селекції та екології.

Викладення основного матеріалу. Об'єкт дослідження: насіннєвий матеріал представників однодольних та дводольних рослин, а саме кукурудзи та гороху. При обранні сортів рослин керувались їх рівнем стресостійкості до впливу факторів середовища, використовуючи один стресостійкий сорт, а інший – менш стійкий. Таким чином сорти кукурудзи – «Феномен» та «Джолі», сорти гороху – «Саксон» та «Мадонна», перший з яких стресостійкий, другий – менш стійкий відповідно.

Методи дослідження: посівну придатність насіння визначали лабораторним методом пророщування [1, 2]. Пророщування контрольних зразків проводили в термостаті за температури +24 °С протягом 7 діб. Дослідні зразки пророщували після впливу гіпотермії (витримування протягом 3 діб при температурі +4^{0}С). Оцінку енергії проростання здійснювали на 5-й день пророщування вручну підраховуючи кількість пророслого насіння, що дозволяло визначити швидкість та дружність проростання. Оцінку схожості насіння проводили на 9-й день, повторно визначаючи кількість пророслого насіння з урахуванням усіх проростків, які з'явилися протягом усього періоду. Це дозволяло оцінити загальну життєздатність партії [3-5].

Методи дослідження показників ПАС включали: визначення маркерів оксидативного стресу за вмістом супероксиданіонрадикалу ($\bullet O_2^-$) та ТБК-активних продуктів ($ТБК_{АП}$); оцінку ферментативного АО захисту, за активністю СОД та каталази; визначення низькомолекулярних АО за вмістом аскорбінової кислоти (АК) на глютатіону (GSH); оцінку рівня вільнорадикального пошкодження (ВРПО) за активністю цитохромоксидази [6, 7]. Концентрацію $\bullet O_2^-$ оцінювали за допомогою спектрофотометричного НСТ-тесту. Вміст $ТБК_{АП}$, які є кінцевими продуктами ВРПО, вимірювали шляхом колориметричної реакції з 2-тіобарбіту-

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

ровою кислотою (ТБК). Активність СОД визначали, вимірюючи її здатність інгібувати реакцію аутоокислення адреналіну в лужному середовищі. Активність каталази досліджували титриметричним методом, модифікованим О.М. Бахом та С.М. Зубковою за розкладом перекису водню та зменшенням його концентрації в реакційній суміші. Концентрацію АК визначали методом титрування за Й. Тільмансом, концентрацію GSH вимірювали колориметрично із використанням реактиву Елмана [8]. Активність цитохромоксидази, кінцевого ферменту дихального ланцюга, визначали за її здатністю окиснювати цитохром *c* (що реєструється спектрофотометрично), використовуючи як субстрати α-нафтол та n-фенілендіамін [7, 9, 10]. Результати аналізували з урахуванням повторень (кратність 10) та відхилень, що забезпечило достовірність отриманих даних.

Результати дослідження контрольної групи наведені в таблиці 1. Показники посівної придатності (енергія проростання та схожість) є критичними для оцінки якості насіння та його потенціалу для формування врожаю. Обидва сорти кукурудзи, «Джолі» та «Феномен», демонструють дуже високі та майже рівні показники енергії проростання (98% та 97%) та схожості (99% та 97%). Сорт «Саксон» має вищі показники посівної придатності (енергія проростання 97%, схожість 98%) порівняно з сортом «Мадонна» (енергія проростання 91%, схожість 96%). Це підтверджує, що сорт «Саксон» є більш стійким порівняно з «Мадонною» за критеріями якості насіння. Порівнюючи культури, можна стверджувати, що насіння кукурудзи (сорту «Джолі») має дещо вищі показники придатності порівняно з горохом, хоча стійкий сорт гороху («Саксон») не поступається стійкому сорту кукурудзи («Феномен»).

Аналіз показників ПАС відображає баланс між генерацією активних форм Оксигену (АФО) та ефективністю їх нейтралізації ферментними й неферментними АО системами [11-13]. Показниками оксидативного стресу є НСТ-тест та $\Delta ТВА_{ар}$. НСТ-тест відображає рівень супероксиданіон радикалу, основного АФО [14]. Стійкіші сорти («Феномен») демонструють нижчу концентрацію $\bullet O_2^-$ порівняно з менш стійкими сортами («Джолі»). Сорт «Саксон» має найнижчий рівень $\bullet O_2^-$, що вказує на його високу стійкість і менший рівень ендогенного стресу, порівняно з «Мадонною». $\Delta ТВА_{ар}$ відображає ступінь пошкодження ліпідних мембран кінцевими продуктами перекисного окиснення ліпідів (ПОЛ). Так, стійкі сорти мають нижче значення $\Delta ТВА_{ар}$. «Феномен» має нижчий рівень, ніж «Джолі». «Саксон» має нижчий рівень, що підтверджує його вищу стійкість до окислювального пошкодження порівняно з «Мадонною».

Усі показники АО захисту (активність каталази, СОД, цитохромоксидази, концентрація АК, GSH) у насінні гороху суттєво вищі, ніж у насінні кукурудзи. Це можна пояснити тим, що горох є дводольною культурою з високим вмістом білка

Таблиця 1

Порівняльна характеристика значень показників стану посівної придатності та ПАС насіння (контроль)

№	Дослідні показники	Сорти кукурудзи		Сорти гороху	
		«Джолі»	«Феномен»	«Мадонна»	«Саксон»
Показники посівної придатності:					
1.	Енергія проростання, %	98 ± 1,01	97 ± 0,88	91 ± 1,04	97 ± 0,98
2.	Схожість насіння, %	99 ± 1,11	97 ± 0,24	96 ± 0,21	98 ± 0,56
Показники прооксидантно-антиоксидантної системи:					
3.	НСТ тест (фоновий рівень), нмоль $\bullet O_2^-$/(г*с)	1,212±0,012	1,086±0,011	0,77±0,009	0,69±0,009
4.	$\Delta ТВА_{ар}$, %	111,95 ± 4,28	100,09 ± 2,31	73,62 ± 1,84	61,92 ± 2,96
5.	Активність каталази, $\frac{мкмоль}{кг * хв}$	0,09 ± 0,01	0,11 ± 0,01	0,45 ± 0,01	0,58 ± 0,01
6.	Активність СОД, ОД	0,19 ± 0,02	0,25 ± 0,01	0,51 ± 0,01	0,59 ± 0,01
7.	Концентрація АК, $\frac{ммоль}{кг}$	0,085 ± 0,01	0,094 ± 0,01	0,264 ± 0,01	0,299 ± 0,01
8.	Концентрація GSH, $\frac{ммоль}{кг}$	37,21 ± 0,18	39,14 ± 0,67	58,97 ± 0,12	59,39 ± 0,12
9.	Активність цитохромоксидази, ОД	0,154±0,002	0,168±0,004	0,306±0,004	0,353±0,008

і, відповідно, амінокислот, які є джерелом для синтезу ферментів АО захисту. Кукурудза ж належить до однодольних з переважанням вуглеводневих клітинних включень. У всіх випадках більш стійкі сорти («Феномен» та «Саксон») мають вищі показники АО активності, порівняно з менш стійкими сортами («Джолі» та «Мадонна»). Так, кукурудза сорту «Феномен» має вищу активність каталази та СОД, що вказує на кращу здатність до інактивації АФК, порівняно з «Джолі». Горох «Саксон» демонструє вищу активність каталази, СОД, вищу концентрацію АК та цитохромоксидази, що підтверджує його підвищену стійкість та ефективнішу систему антиоксидантного захисту порівняно з «Мадонною».

Аналіз результатів дозволяє зробити припущення про прямопропорційну залежність між показниками посівної придатності та функціональним станом ПАС: насіння з кращою посівною придатністю (вищою енергією проростання та схожістю) характеризується ефективнішою прооксидантно-антиоксидантною системою. Так, стійкі сорти («Феномен» та «Саксон») мають збалансовану ПАС (низький рівень показників оксидативного стресу, що свідчить про менше пошкодження клітинних структур насіння) та високий антиоксидантний потенціал, що здійснює швидку і ефективну нейтралізацію АФО, які утворюються на початкових етапах проростання. Отже ефективність роботи ПАС, особливо висока активність каталази і СОД у поєднанні з низьким рівнем АФК, є біохімічною основою високої посівної придатності та стійкості насіння.

Результати дослідження експериментальної групи, яка піддавалась впливу гіпотермії, наведені в таблиці 2.

Результати свідчать, що горох сорту "Мадонна" показав стабільно високі показники енергії проростання (88–94%) та схожості (95–98%) у контрольному варіанті. Після впливу гіпотермії ці показники не лише збереглися, а й дещо підвищились, що свідчить про морозостійкість сорту. Горох сорту "Саксон" виявився найстійкішим до впливу низьких температур: у всіх варіантах енергія проростання залишалась на рівні 96–99%, а схожість в окремих випадках сягала 100%. Кукурудза сорту "Джоді" продемонструвала відмінні показники як у звичайних умовах, так і після впливу гіпотермії. Це свідчить про стабільну життєздатність насіння та стійкість до короткочасного зниження температури. Кукурудза сорту "Феномен" виявилася більш чутливою до впливу холоду. У контрольному варіанті маємо високі результати (енергія проростання – 94–99%, схожість – 95–100%), проте після переохолодження показники суттєво знизились: енергія проростання – до 81–88%, схожість – до 89–91%. Це вказує на обмежену холодостійкість і необхідність обережного використання сорту у регіонах із ранньою весняною посівною кампанією.

Аналіз показників ПАС свідчить, що гіпотермія призводить до зростання рівня генерації супероксиду в тканинах курурудзи сорту «Джолі» на

Таблиця 2

Порівняльна характеристика значень показників стану посівної придатності та ПАС насіння (експериментальна група, вплив гіпотермії)

№	Дослідні показники	Сорти кукурудзи		Сорти гороху	
		«Джолі»	«Феномен»	«Мадонна»	«Саксон»
Показники посівної придатності:					
1.	Енергія проростання, %	98 ± 1,01	85 ± 1,09	96 ± 0,91	97 ± 1,01
2.	Схожість насіння, %	98 ± 1,11	90 ± 1,12	97 ± 0,99	99 ± 0,84
Показники прооксидантно-антиоксидантної системи:					
3.	НСТ тест (фоновий рівень), нмоль $\bullet O_2^-$/(г*с)	1,346±0,009	1,170±0,006	0,94±0,006	0,72±0,011
4.	$\Delta ТВА_{ар}$, %	135,96 ± 2,43	100,09 ± 2,31	92,21 ± 1,28	64,39 ± 0,99
5.	Активність каталази, $\frac{мкмоль}{кг * хв}$	0,10 ± 0,01	0,12 ± 0,01	0,49 ± 0,01	0,67 ± 0,02
6.	Активність СОД, ОД	0,21 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,60 ± 0,01	0,72 ± 0,03
7.	Концентрація АК, $\frac{ммоль}{кг}$	0,099 ± 0,01	0,114 ± 0,01	0,309 ± 0,04	0,370 ± 0,03
8.	Концентрація GSH, $\frac{ммоль}{кг}$	40,69 ± 0,11	43,48 ± 0,27	60,04 ± 0,09	63,31 ± 0,13
9.	Активність цитохромоксидази, ОД	0,154±0,002	0,168±0,004	0,351±0,009	0,456±0,014

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

11,03%, в тканинах сорту «Феномен» на 7,74%, рівень ΔTBA_{ap}, зростає на 24,01% та 6,22% відповідно порядку згаданих сортів. Активність каталаз достовірно не змінюється, активність СОД зростає на 48% тільки в тканинах сорту «Феномен». Зміни низькомолекулярних антиоксидантів є суттєвішими: так, гіпотермія призводить до зростання вмісту АК в тканинах кукурудзи сорту «Джолі» на 16,04%, а в тканинах сорту «Феномен» на 21%, вміст GSH зростає на 9,34% та 11,08% відповідно. Активність цитохромоксидази зросла на 6,06% для сорту «Джолі» та 14,19% для «Феномен». Загальна тенденція впливу гіпотермії полягає у значно більшому зростанні показників окисного стресу для менш стійкого сорту «Джолі» та меншому зростанні ступеня антиоксидантного захисту. В тканинах більш стійкого сорту «Феномен» спостерігаємо незначне зростання прооксидантної ланки та більше посилення антиоксидантної активності, що має відображення у кінцевому результаті на значення активності цитохромоксидази, що є маркером ступеня вільнорадирального пошкодження мембран.

Вплив гіпотермії на біохімічні показники тканин насіння гороху різних ростів проявляє подібну тенденцію: так, генерація супероксиду зростає на 22% в тканинах насіння сорту «Мадонна» та всього на 4% в тканинах сорту «Саксон», зростання ΔТВАар складає 18,59% та 2,47% відповідно. Звертає увагу посилення активності АО ланки як за разунок ферментних, так і низькомолекулярних АО в тканинах обох сортів, що, можливо пояснюється білковими резервами, які є джерелом амінокислот для синтезу ензимних АО. Так, активність каталази зростає на 9,01% та 16,07%, СОД – на 18,04% та 22,36% відповідно сорту «Мадонна» та «Саксон». Вміст аскорбінової кислоти зростає на 17,07% та 23,81%, різниця вмісту GSH не достовірна, активність цитохромоксидази зроста на 12,5% та 29,34% відповідно порядку згадування сорту.

Виходячи із встановлених числових змін, слідує, що стійкі сорти мають вищий початковий рівень АО або більш стабільну структуру мембран, що забезпечує кращий "буфер" проти раптового холодового стресу. Стійкі сорти здатні швидше і потужніше індукувати синтез АО у відповідь на генерацію АФО, забезпечуючи ефективне їхнє знешкодження і запобігаючи масовому пошкодженню. Малостійкі сорти мають повільнішу або слабшу реакцію, що призводить до накопичення АФО, як-от супероксиду, і, як наслідок, до інтенсивного перекисного окислення ліпідів мембран, маркером якого є ΔТВАар. Зростання активності АО ланки в насінні гороху обох сортів можна пояснити високими білковими резервами, які слугують джерелом амінокислот для синтезу нових ферментних АО (СОД, каталаза). Отримані дані мають вагоме практичне значення, так, наприклад, сорти з високою холодостійкістю ("Саксон", "Джоді") є пріоритетними для регіонів із ранньою весняною посівною кампанією, де існує високий ризик короткочасних заморозків або низьких температур ґрунту. Їхнє насіння забезпечить високу схожість і польову життєздатність. Сорти з обмеженою холодостійкістю ("Феномен") вимагають обережного використання і можуть бути придатні лише для пізніших термінів посіву або в тепліших регіонах. Показники стану ПАС можуть слугувати ранніми маркерами для оцінки холодостійкості нових сортів у селекції.

Головні висновки:

1. У стійкіших сортів рослин спостерігаються вищі показники посівної придатності, нижчий рівень показників оксидативного стресу, вищі показники АО захисту порівняно з менш стійкими сортами.

2. Вплив гіпотермії суттєво знижує показники посівної придатності лише у кукурудзи сорту «Феномен». Показники енергії проростання та схожості збереглися або підвищилися у стійких сортів. Гіпотермія призводить до зростання значення прооксидантної активності в усіх досліджуваних сортах, а також посилення антиоксидантного захисту (зростання активності СОД, каталази, вмісту АК та GSH).

3. Стійкі сорти (горох «Саксон», кукурудза «Джоді») здатні швидше і потужніше індукувати синтез антиоксидантів у відповідь на холодовий стрес. Це забезпечує ефективне знешкодження АФО та мінімізацію пошкоджень клітинних мембран, що відображається меншим зростанням активності цитохромоксидази. Малостійкі сорти мають повільнішу або слабшу реакцію АО захисту, що призводить до накопичення АФО, інтенсивного перекисного окислення ліпідів та значного вільнорадикального пошкодження мембран.

4. Встановлено прямопропорційну залежність між показниками посівної придатності та функціональним станом ПАС: насіння з кращою посівною придатністю характеризується ефективнішою ПАС.

5. Вища активність каталази і СОД у поєднанні з низьким рівнем АФО є біохімічною основою високої посівної придатності та стійкості насіння. Показники стану ПАС можуть слугувати інформативними маркерами та ранніми інструментами прогнозування, аналіз яких дозволяє краще зрозуміти молекулярні механізми стійкості рослин до стресових чинників. Встановлені характеристики дозволяють більш точно прогнозувати життєздатність і стійкість рослин, що має практичне значення для підвищення ефективності передпосівної підготовки насіння, оптимізації агротехнічних рішень та зниження витрат шляхом раннього виявлення слабкого матеріалу.

Перспективи використання результатів дослідження. Одержані дані відкривають широкі можливості для впровадження у практику аграрних підприємств, селекційних центрів та науково-дослідних установ з метою підвищення біологічної та технологічної ефективності рослинництва. Встановлені біохімічні характеристики ПАС дозволяють розробити системи раннього моніторингу якості насіннєвого матеріалу, що забезпечить точне прогнозування життєздатності та продуктивності культур ще до моменту висіву. Перспективним напрямом є використання виявлених маркерів оксидативного стресу для верифікації холодостійкості нових сортів, що дозволить раціонально підбирати асортимент рослин для конкретних кліматичних зон та оптимізувати терміни посівних кампаній. Крім того, результати дослідження можуть стати підґрунтям для вдосконалення методів передпосівної підготовки насіння, спрямованих на штучне посилення антиоксидантного «буфера», що в перспективі мінімізує виробничі витрати та забезпечить стабільні врожаї навіть за умов нестабільного температурного режиму.

Література

1. Державна установа «Волинська обласна фітосанітарна лабораторія». Визначення посівної якості насіннєвого матеріалу. Луцьк, 2021.
2. Капинос М. В., Калитка В. В. Вплив регуляторів росту рослин і мікробних препаратів на проростання насіння та початковий ріст гороху посівного (Pisum sativum L.). Таврійський науковий вісник, 2016, № 96, с. 66–70.
3. Косов О. І., Фомін О. В. Технологія вирощування сільськогосподарських культур. Харків: ФОП Бровін О. В., 2018. 364 с.
4. Методичні рекомендації до проведення передпосівної обробки насіння / ред. Мельник О. П. Київ: IAE, 2015. 48 с.
5. УкрСпецАгроПродукт. Аналіз посівних якостей насіння [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://usap.ua/
6. Berwal M.K., Ram C. Superoxide Dismutase: A stable biochemical marker for abiotic stress tolerance in higher plants. 2018. Open access peer-reviewed chapter. DOI: 10.5772/intechopen.82079
7. Bobrova M., Holodaieva O., Koval S., Kucher O., Tsviakh O. Features of changes in prooxidant- antioxidant balance of tissues during activation of seed germination. Journal of the University of Zulia. 2022. № 13(37). P. 362–382
8. Hasanuzzaman M., Nahar K., Anee T.I., Fujita M. Glutathione in plants: Biosynthesis and physiological role in environmental stress tolerance. PMBP. 2017. № 23. P. 249–268. 8. Janků M, Luhová L, Petřivalský M. On the Origin and Fate of Reactive Oxygen Species in Plant Cell Compartments. Antioxidants (Basel). 2019. № 8(4). P. 105.
9. Marrocco I, Altieri F, Peluso I. Measurement and Clinical Significance of Biomarkers of Oxidative Stress in Humans. Oxid Med Cell Longev. 2017. 6501046. doi: 10.1155/2017/6501046
10. Morales M, Munné-Bosch S. Malondialdehyde: Facts and Artifacts. Plant physiology. 2019. № 180(3). P. 1246–1250.
11. Nandi A., Liang-Jun Y., Jana C.K., Dascorresponding N. Role of Catalase in Oxidative Stress- and Age-Associated Degenerative Diseases. Oxid Med Cell Longev. 2019. 9613090. doi: 10.1155/2019/9613090
12. Pacheco J. H. L., M. A. Carballo, and M. E. Gonsebatt. “Antioxidants against environmental factor-induced oxidative stress” in Nutritional Antioxidant Therapies. Treatments and Perspectives. 2018. № 8. P. 189–215.
13. Paciolla C.; Fortunato, S.; Dipierro, N.; Paradiso, A.; De Leonardis S. (2019). Vitamin C in Plants: From Functions to Biofortification. Antioxidants. 2019. № 8(11). P. 519.
14. Rampon C., Volovitch M., Joliot A., Vriz S. Hydrogen Peroxide and Redox Regulation of Developments. Antioxidants. 2018. № 7. P. 159.

Дата першого надходження статті до видання: 30.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 635.615:631.5:581.132
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.21

ВПЛИВ АГРОТЕХНІКИ НА ФОТОСИНТЕТИЧНИЙ ПОТЕНЦІАЛ СОРТІВ *CITRULLUS LANATUS* (THUNB.) MATSUM. & NAKAI

Кравець М.Я., .Грицак Л.Р.
Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка
вул. М. Кривоноса, 2, 46027, м. Тернопіль
kravets@chem-bio.com.ua, hrytsak1972@gmail.com

У статті висвітлено результати фізіологічних досліджень адаптації кавуна звичайного (*Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum. & Nakai) до нетипових умов Західного Лісостепу України (2024–2025 рр.). Актуальність роботи зумовлена необхідністю переміщення зон культивування баштанних культур у західні регіони через кліматичні зміни та воєнні дії на Півдні України. Досліджено динаміку фотосинтетичних пігментів сортів «Кримсон Світ», «Вогник» та гібриду «Топган» залежно від способу отримання посадкового матеріалу (розсадний, насіннєвий, щеплення на гарбуз мускатний *(Cucurbita moschata* Duch.) та впливу регуляторів росту. Встановлено, що застосування рекультиванту «Trevitan^{R}» та мікоризного препарату «Mikovit» інтенсифікує біосинтез хлорофілів a, b та каротиноїдів, забезпечуючи високу фотосинтетичну активність упродовж усієї вегетації. Передпосівна обробка насіння «Trevitan^{R}» підвищує енергію проростання, прискорюючи появу сходів на 2–5 діб. Доведено, що технологія щеплення є найбільш ефективною для стабілізації пігментного комплексу: щеплені рослини демонструють мінімальне міжстадійне коливання вмісту хлорофілів порівняно з насіннєвим способом. Виявлено диференційовану дію препаратів: біопрепарат «Mikovit» виявився найбільш ефективним при розсадному методі, тоді як «Trevitan^{R}» показав перевагу при прямому висіві у ґрунт та щепленні. Узагальнені дані підтверджують високу екологічну пластичність виду та доцільність впровадження інтегрованих технологій (мікоризація, щеплення, стимуляція росту) для стабілізації врожайності кавуна в умовах Західного регіону. *Ключові слова:* Citrullus lanatus, фотосинтетичні пігменти, адаптація, щеплення, мікоризація, стимулятори росту, Західний Лісостеп.

The effect of agronomic practices on the photosynthetic potential of *Citrullus lanatus* (thunb.) Matsum. & nakai varieties. Kravets M., Hrytsak L.

The article highlights the results of physiological studies on the adaptation of common watermelon (*Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum. & Nakai) to the atypical conditions of the Western Forest Steppe of Ukraine (2024–2025). This article presents the results of comprehensive physiological and biochemical studies on the adaptation of the common watermelon (*Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum. & Nakai) to the atypical conditions of the Western Forest-Steppe of Ukraine (2024–2025). The relevance of this work stems from the need to shift melon cultivation zones to western regions due to climate change and military operations in southern Ukraine. The dynamics of photosynthetic pigments in the varieties «Crimson Sweet», «Vognik», and the «Topgan» hybrid were studied depending on the method of obtaining planting material (seedlings, seeds, grafting onto nutmeg squash Cucurbita moschata Duch.) and the influence of growth regulators. It was established that the application of the recultivant «Trevitan^{R}» and the mycorrhizal preparation «Mikovit» intensifies the biosynthesis of chlorophylls a, b, and carotenoids, ensuring high photosynthetic activity throughout the entire growing season. Pre-sowing treatment of seeds with «Trevitan^{R}» increases germination energy, accelerating the emergence of seedlings by 2–5 days. It has been proven that the grafting technology is the most effective for stabilizing the pigment complex: grafted plants demonstrate minimal inter-stage fluctuations in chlorophyll content compared to the seed method. A differentiated effect of the preparations was observed: the biological preparation «Mikovit» proved most effective with the seedling method, while «Trevitan^{R}» showed an advantage with direct seeding into the soil and grafting. The summarized data confirm the species' high ecological plasticity and the feasibility of implementing integrated technologies (mycorrhization, grafting, growth stimulation) to stabilize watermelon yields in the conditions of the Western region. *Key words:* Citrullus lanatus, photosynthetic pigments, adaptation, grafting, mycorrhization, growth stimulants, Western Forest-Steppe.

Постановка проблеми. Кліматичні зміни, погіршення водозабезпечення південних регіонів України, військові дії призвели до зменшення виробництва кавунів (*Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum. & Nakai) у регіонах, де вони традиційно культивувалися. Це передбачає розширення площ під вирощування у інших регіонах України, зокрема у західному. Успішність технологій акліматизації цього виду до нових умов вирощування залежить від розуміння механізмів перебігу його фізіологічних процесів та можливості цілеспрямованого впливу на них.

У нових умовах культивування видів фізіологічні реакції рослин на біотичні та абіотичні стреси змінюються [6; 4]. Ці зміни залежать від інтенсивності впливу стресорів та тривалості їх дії [14]. Зазначають, що за тривалого перебування рослин у абіотичних умовах росту, що виходять за межі їх видових потреб, спостерігається зниження інтенсивності фотосинтетичних процесів і врожайності [23]. Тому, вивчення реакцій пігментного комплексу різних сортів і гібридів кавуна звичайного залежно від агротехніки їх вирощування у нових ґрунто-

© Кравець М.Я., .Грицак Л.Р., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

во-кліматичних умовах дозволить оцінити ступінь екологічної пластичності виду та перспективи його подальшої акліматизації в умовах Західного регіону України.

Актуальність дослідження. В останні роки низка фермерських господарств розпочала вирощування кавунів в умовах західних областей України не лише у теплицях [29;36;37], але й у відкритому ґрунті [31;33]. Упродовж останніх десятиліть зростає попит на сорти кавуна, призначені для особистого споживання [5], а також на адаптивні сорти та гібриди, здатні забезпечувати стабільно високі врожаї за різних гідротермічних умов. Зазначають, що сучасна селекція десертних сортів кавуна в Україні обмежена вузьким генетичним базисом та значною вразливістю культури до патогенів і шкідників [35]. Натомість дикі види *Citrullus L.*, завдяки високій екологічній пластичності та природній резистентності до фузаріозного в'янення (*Fusarium oxysporum f. sp. niveum*), виступають як фундаментальний генетичний резерв [10;13].

Одним із ключових показників, що дозволяє оцінити здатність виду адаптуватися до ґрунтово-кліматичних умов росту є стан пігментного комплексу рослин [1;8]. Це пов'язано з тим, що вміст хлорофілу a (*Chl a*) визначає продуктивність рослин, тоді як хлорофіл b (*Chl b*) відображає рівень їхнього адаптаційного потенціалу до умов середовища. Співвідношення *Chl a*/*Chl b* використовують як інформативний критерій для оцінювання фізіологічних особливостей рослин, активності фотосинтетичної системи, характеру онтогенетичних змін і реакцій на стресові чинники [21].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Представлена наукова робота є результатом багаторічних досліджень авторів, спрямованих на розв'язання важливих наукових завдань фізіології рослин, агроекології та рослинництва, зокрема на поглиблене вивчення адаптивного потенціалу виду *C. lanatus* до нових агрокліматичних умов вирощування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематиці досліджень C. lanatus приділяється значна увага в науковій літературі. Основні напрями досліджень зосереджені на фенології рослин різних сортів і гібридів, їх адаптивності до абіотичних та біотичних стресових чинників, а також на агротехнічних підходах, що забезпечують підвищення продуктивності та якості плодів. Так, показано, що фенологічні стадії кавуна, особливо цвітіння та плодоношення, є чутливими до дефіциту води та інших метеофакторів. В умовах водного стресу часто спостерігається скидання квітів та опадання плодів [19]. Tlevlessova та співавт. (2023) відзначають, що висока чутливість рослин до змін зовнішніх умов позначається на тривалості феностадій та формуванні зав'язі [22].

Ущільнення посівів цукровою кукурудзою та овочевою квасолею, дозволяє впливати на фенологію і насіннєву продуктивність кавуна. В умовах північного Степу України, де високі температури та низька відносна вологість повітря є критичними факторами, така агротехніка сприяє підвищенню урожайності кавунів і формуванню повноцінного насіння [34]. Щеплення рослин на відповідні підщепи покращує водо- та мінеральне живлення, підвищує урожайність і якість плодів, а також стійкість до абіотичних стресів [3;15;24;27]. З'ясовано, що вища стійкість щеплених рослин зумовлена модифікаційними перебудовами кореневої системи, більшою глибиною та розгалуженістю коренів, підвищеною гідравлічною провідністю та активнішим синтезом регуляторних фітогормонів [15].

Внесення органічних добрив дозволяє забезпечити покращення морфологічних і фізіологічних параметрів розсади кавуна: підвищення біомаси пагонів, водного статусу тканин, площі листкової поверхні та розвитку кореневої системи. Застосування такої агротехніки підвищує адаптивність рослин і сприяє їхньому швидшому укоріненню після пересаджування [28]. Не менш ефективним є використання ендофітних арбускулярних мікоризних грибів, таких як Curvularia protuberata, Fusarium culmorum, Piriformospora indica, Phoma glomerata LWL2, Penicillium sp. LWL3, Paecilomyces formosus LHL10, Neotyphodium lolii та Trichoderma spp. [16]. Мікоризація сприяє підвищенню посухостійкості розсади кавуна та покращенню засвоєння макро- і мікроелементів в умовах водного дефіциту [16;28].

У низці наукових праць аналізується короткочасний вплив низьких температур на перебіг фотосинтетичних процесів. Зазначають, що короткочасні впливи низьких температур гальмують фотосинтез у рослин, що знаходяться на початкових етапах онтогенезу, але не мають суттєвого впливу на особини, що перебувають на стадії плодоношення і не знижують їхню продуктивність [8;20].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Успішність вирощування агрокультур у нових агрокліматичних умовах визначається їхнім адаптаційним потенціалом. Вміст і співвідношення фотосинтетичних пігментів є ключовими показниками життєздатності рослин. Проте недостатньо досліджено вплив мікоризації та стимуляторів росту на функціонування фотосинтетичного апарату рослин кавуна звичайного, отриманих безрозсадним, розсадним способами та за використання технології щеплення на *Cucurbita moschata* Duch. Це і є предметом цього дослідження.

Новизна. Вперше в умовах Західних областей України досліджено вплив на пігментний комплекс деяких сортів та гібриду *C. lanatus* агротехнічних прийомів його вирощування, а саме: використанням різних способів отримання посадкового матеріалу; додаткового доосвітленням розсади кавуна у період вирощування її в теплиці; мікоризації рослин препа-

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

ратом «Mikovit»; оброблення насіння та рослин для стимуляції росту рекультивантом композиційним «Trevitan^{R}».

Методологічне або загальнонаукове значення. Мета нашої роботи полягає у досліджені залежності реакції пігментного комплексу рослин ранніх сортів «Кримсон Світ», «Вогник» та гібриду «Топган» кавуна звичайного від агротехніки вирощування в умовах Західного Лісостепу України.

Результати дослідження спрямовані на з'ясування адаптивного потенціалу ранніх сортів і гібридів кавуна звичайного до вирощування у нетипових для нього агрокліматичних умовах та оцінку можливості використання мікоризних грибів (біопрепарат «Mikovit») і стимулятора росту органічного походження рекультиванту композиційного «Trevitan^{R}» для підтримання нормального функціонування фотосинтетичного апарату рослин упродовж усього вегетаційного періоду.

Виклад основного матеріалу.

Дослідження проводилося у 2024 р., 2025 р. на важко суглинистому чорноземі типовому агробіолабораторії Тернопільського національного університету імені В. Гнатюка упродовж вегетаційних періодів. Середні значення pH_{KCl} у шарі ґрунту 0-25 см становлять 7,35 (за ДСТУ ISO 10390-2001), уміст гумусу –2,63% (за ДСТУ 4289-2004), легкогідролізованого Азоту – 98,0 мг/кг (за ДСТУ 7863-2015), рухомого Фосфору – 98,53 мг/кг (за ДСТУ 4114-2002), обмінного Калію – 84,1 мг/кг (за ДСТУ 7861-2015). Досліджувана територія розташована в Лісостеповій зоні України. Відносна вологість повітря упродовж вегетаційних періодів польових досліджень перебувала в межах 65,3–69,0%, середня температура повітря більше +10°С спостерігалася з 25–30 квітня до 01–06 жовтня.

Досліджували ранні сорти *C. lanatus* — «Кримсон Світ», «Вогник» та гібрид «Топган». Посадковий матеріал отримували 3 способами: 1 – вирощування розсади у теплиці (розсадний спосіб); 2 – вирощування з насіння у відкритому ґрунті (насіннєвий спосіб); 3 – щеплення рослин кавуна на мускатний гарбуз (*Cucurbita moschata* Duch.*)* на етапі початку формування першого справжнього листка. У кожному експерименті схема досліду передбачала контрольну групу та два експериментальні варіанти: **Варіант 1:** передпосівне замочування насіння та обробка рослин 1% розчином рекультиванту «Trevitan^{R}» (ДСТУ 7099). **Варіант 2:** передпосівне замочування насіння та обробка рослин біопрепаратом «Mikovit» (концентрація 0,2 мл/мл для насіння, 2 мл/л – для рослин).

У кожній групі було по 5 рослин кожного сорту/гібриду. Насіння контрольної групи замочували у відстояній водопровідній воді, дослідних варіантів – у відповідних розчинах препаратів упродовж 2 год. Обробку рослин дослідних груп проводили тричі упродовж вегетаційного періоду (активного росту, цвітіння, плодоношення) з інтервалом 20 днів.

Насіння висівали у пластикові касети (200–350 мл), заповнені ґрунтосумішшю на глибину 2 см, або одразу у відкритий ґрунт. Рослини у теплиці упродовж перших 10 днів після проростання додатково освітлювали 12 год/добу світлодіодами (холодний білий, червоний, синій спектри у співвідношенні 1:2:1) з інтенсивністю світлового потоку 100 мкмоль·м$^{-2}$·с$^{-1}$. Температура повітря у теплиці підтримували у межах 18-20˚ С. Розсаду перед висаджуванням у відритий ґрунт загартовували, поступово знижуючи температуру у теплиці до 13-15˚ С.

Вміст фотосинтетичних пігментів визначали на стадіях активного росту, цвітіння та плодоношення у 5 особин кожного сорту/гібриду за допомогою диметилсульфоксидної екстракції [7]. Хлорофіли *a* і *b* розраховували за формулою Макінні-Арнона, каротиноїди – за Веттштейном [7]. Результати виражали у мг на 100 г сирої маси листків [9].

Статистичну обробку даних здійснювали за допомогою дисперсійного аналізу ANOVA з використанням критерію достовірної різниці групових середніх Тьюкі (Honestly Significant Difference) за використання програмного забезпечення Prism 6. Критичний рівень значимості при перевірці статистичних гіпотез у дослідженні приймався рівним 0,05.

Результати досліджень та їх обговорення. Результати дослідження продемонстрували, що швидкість появи перших сходів у щепленого та розсадного способу вирощування значною мірою залежала від обробки насіння препаратами. Оброблення рекультивантом «Trevitan^{R}» сприяло прискореному проростанню насіння, порівняно з препаратом «Mikovit», що відображалося у появі сходів на 4–5-й добу після висаджування у Варіанті 1. У Варіанті 2 та контрольній групі сходи з'являлися на 7–8-й добу. За безрозсадного способу отримання рослин шляхом прямого висаджування насіння у ґрунт перші сходи спостерігалися через 8–10 діб за сприятливих умов. Міжсортових відмінностей у проростанні насінні не було виявлено. Отримані дані свідчать про вплив препаратної обробки на підвищення енергії проростання та початкову життєздатність рослин C. lanatus.

Виявлено, що вміст фотосинтетичних пігментів та їхнє співвідношення у рослинах *C. lanatus* досліджених сортів та гібриду залежать від міжрічної динаміки метеочинників, від типу препарату, яким обробляли насіння та особини упродовж вегетаційного періоду, а також від способу отримання посадкового матеріалу.

У 2024 р. загальний вміст пігментів у рослин контрольної групи гібриду «Топган», отриманих розсадним способом, на стадії активного росту був у 2,0 рази нижчим порівняно зі стадіями цвітіння та плодоношення (Рис. 1). Максимальні значення цього показника зафіксовано у фазі цвітіння, тоді як у фазі

плодоношення він знижувався на 10 %. У 2025 р. на стадії активного росту у контрольній групі рослин загальний вміст пігментів був вищим на 41% за показник попереднього року. У рослин цієї групи високий рівень пігментів підтримувався упродовж усього вегетаційного періоду і на феностадіях активного росту та плодоношення статистично достовірно їх показники між собою не відрізнялися. На стадії цвітіння вміст пігментів був нижчим на 20% порівняно з іншими феностадіями.

У рослин дослідних варіантів цього гібриду, отриманих розсадним способом, також зафіксовано значні міжрічні коливання загального вмісту пігментів. У 2024 р. на фазі цвітіння у рослин, оброблених рекультивантом «Trevitan^{R}» (Варіант 1), загальний вміст пігментів у двічі перевищував показники контрольної групи та Варіанту 2. Проте на стадії цвітіння цей показник у рослин Варіанту 1 знижувався на 14% і на такому рівні вміст пігментів підтримувався й на стадії плодоношення. У рослин Варіанту 2 на стадії активного росту вміст пігментів статистично достовірно не відрізнявся від рослин контролю. Однак різко (у 2,5 рази) зростав на стадії цвітіння, перевищуючи значення рослин контролю і Варіанту 1 на 11%, і на стадії плодоношення лише незначно знижувався. Серед досліджених груп у 2024 р. найвищий вміст пігментів на стадіях цвітіння і плодоношення був у рослин Варіанту 2. У 2025 р. на стадії активного росту вміст пігментів у рослин усіх груп статистично достовірно не відрізнявся та перевищував показники 2024 р. контрольної групи і Варіанту 2 майже удвічі. На стадіях цвітіння та плодоношення у дослідних групах загальний вміст пігментів був вищим, ніж у контрольній. Найвищі значення зафіксовані у рослин Варіанту 1.

Аналіз загальних тенденцій щодо міжгрупового та міжрічного коливання вмісту пігментів рослин гібриду «Топган» показав, що оброблення насіння та рослин рекультивантом композиційним «Trevitan^{R}» (Варіант 1) і біопрепаратом «Mikovit» (Варіант 2) стимулює біосинтез пігментів. Це пояснює вищі значення пігментів у рослин дослідних груп порівняно з контрольною. На вміст пігментів впливають й погодні умови, що зумовлює їх міжрічну динаміку. Загальний вміст пігментів у рослин усіх груп був вищим у 2025 р.

За насіннєвого способу отримання посадкового матеріалу гібриду «Топган» міжрічне і міжстадійне коливання вмісту пігментів було менш вираженим (рис. 1). Тенденції міжстадійного коливання загального вмісту пігментів у рослин контрольної групи подібні до контрольної групи 2025 р. рослин, отриманих розсадним способом: найвищий вміст на стадії активного росту, а далі знижується і статистично достовірно не відрізняється на стадіях цвітіння і плодоношення як у 2024 р., так й у 2025 р. Загалом, порівняно з розсадним способом, загальний вміст пігментів у листках рослин контрольної групи за

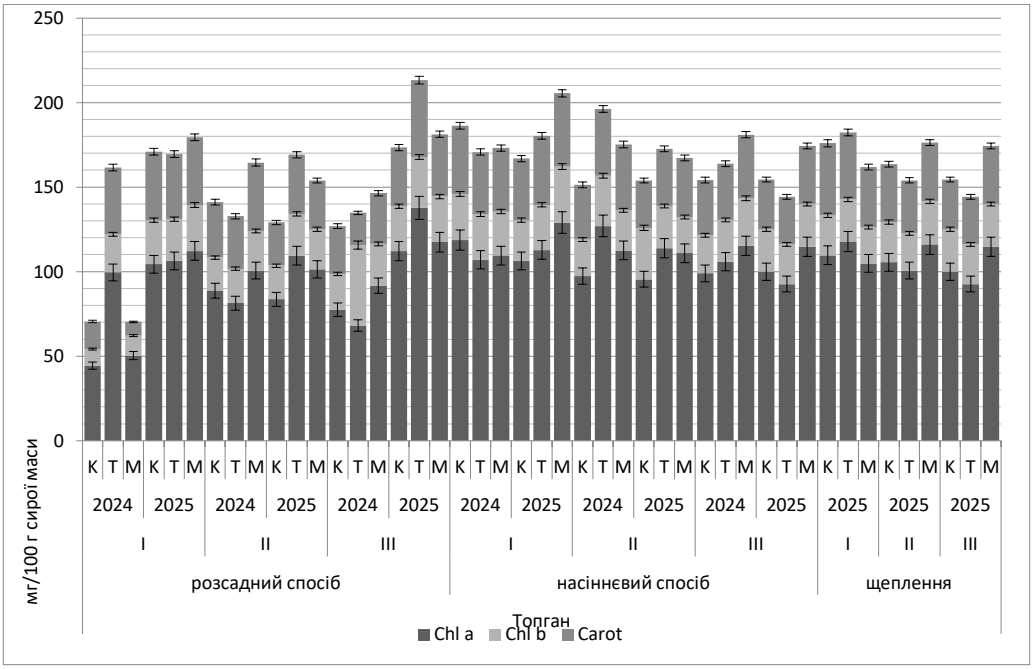


Рис. 1. Динаміка фотосинтетичних пігментів у листках рослин гібриду «Топган» упродовж вегетаційних сезонів 2024 р. і 2025 р. залежно від агротехніки вирощування. Умовні позначення: I – фаза активного росту; II – фаза цвітіння; III – фаза плодоношення; К – контроль, М – оброблення препаратом «Mikovit»; Т – оброблення препаратом «Trevitan^{R}»

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

насіннєвого способу вирощування був вищим на 14% (залежно від року дослідження та варіанту досліду). Це свідчить про кращу адаптацію фотосинтетичного апарату рослин безпосереднього посіву в ґрунт до умов середовища та формування потужнішого потенціалу асиміляційних пігментів. Вміст пігментів у 2024 р. у рослин Варіанту 1 найвищим був на стадії цвітіння, а на стадіях активного росту і плодоношення статистично достовірно між собою не відрізнявся. У 2025 р. була дещо інша тенденція: на двох перших фенофазах показники вмісту пігментів були вищими від значень стадії плодоношення і статистично достовірно між собою не відрізнялися. У рослин Варіанту 2 упродовж вегетаційного періоду 2024 р. не виявлено суттєвих міжстадійних змін вмісту пігментів. А у 2025 р. тенденції динаміки були подібні до рослин розсадного способу: найвищий вміст на стадії активного росту, на інших стадіях дещо (на 4%) знижувався і на 2 і 3 феностадіях статистично достовірно вже не відрізнявся.

Результати аналізу міжваріантних відмінностей показали, що упродовж 2 вегетаційних сезонів досліджень зберігалися подібні тенденції щодо вмісту пігментів на стадіях цвітіння і плодоношення: у другій феностадії завжди у рослин Варіанту 1 загальний вміст пігментів вищий, а на 3 феностадії – він вищий у рослин Варіанту 2. На стадії цвітіння не виявлено й значних міжрічних коливань вмісту пігментів у цих дослідних групах рослин.

Ще однією технологію, яку було використано у 2025 р. для отримання посадкового матеріалу – це щеплення кавунів на мускатний гарбуз. Результати аналізу вмісту пігментів у цій групі показали збереження тих же тенденцій, які були виявлені у 2025 р. й у рослин, отриманих за інших технологій. На стадії активного росту вміст пігментів був найвищим, як у контролі, так й інших дослідних варіантах. У подальшому вміст пігментів поступово зменшувався. Так, на стадії цвітіння їх вміст коливався в межах 162-178 мг/ г сирої маси, а на феностадії плодоношення – 152-172 мг/ г сирої маси. Однак відмінною ознакою цієї групи від інших є вищий вміст пігментів у рослин Варіанту 2 як на стадії цвітіння, так і плодоношення. У рослин, отриманих насіннєвим і розсадним способами, зазвичай вміст пігментів був вищим у дослідній групі Варіанту 1.

Результати міжрічного та міжваріантного коливання вмісту пігментів у рослин сорту «Вогник» представлено на рис. 2. Показано, що у 2025 р. незалежно від способу отримання посадкового матеріалу, загальний вміст пігментів в усіх групах був вищим на стадіях активного росту і плодоношення. Особливістю цього сорту є вищий вміст пігментів у рослин контрольною групи на стадії активного росту за розсадного способу отримання посадкового матеріалу, а за насіннєвого способу та за щеплення – статистично достовірно не відрізнявся від дослідних варіантів. Однак у рослин, отриманих насіннєвим способом, оброблення препаратами підвищувало вміст пігментів, порівняно із контролем, на феностадіях активного росту та цвітіння.

Водночас, зафіксовано відмінності у реакції фотосинтетичного апарату рослин на оброблення препаратами залежно від способу їх отримання. Так, застосування біопрепарату «Mikovit» (Варіант 2) сприяло підвищенню вмісту пігментів у рослин, отриманих розсадним способом. Рекультивант композиційний «Trevitan^{R}» (Варіант 1) ефективніше впливам на біосинтез пігментів у рослин, отриманих насіннєвим способом і щепленням. Водночас за використання технології щеплення, у рослинах підвищувався вміст хлорофілу *a* та зменшувався діапазон міжстадійного коливання загального вмісту пігментів як в контрольній групі, так і дослідних.

Результати дослідження динаміки фотосинтетичних пігментів сорту «Кримсон Світ», (рис. 3) показали, що у 2025 р. їхній вміст у рослинах усіх дослідних груп також був вищим, порівняно з 2024 р. Порівняно із сортом Вогник, міжстадійне коливання вмісту пігментів у рослин цього сорту є менш вираженим. Найвищі показники вмісту пігментів є на стадіях активного росту та плодоношення незалежно від способу отримання посадкового матеріалу, а обробка посадкового матеріалу препаратами підвищує накопичення пігментів у фотосинтетичному апараті. Як й у випадку сорту «Вогник», застосування біопрепарату «Mikovit» дозволяє підвищити вміст пігментів у рослинах за розсадного способу їх отримання. Рекультивант композиційний «Trevitan^{R}» ефективніше використовувати за насіннєвого способу отримання рослин і технологій їх щеплення.

Обговорення результатів. У науковій літературі зазначається, що ключові чинники успішного вирощування культур у певних агрокліматичних умовах визначаються відповідністю середовища їхнім біологічним потребам та генотипом сортів, який забезпечує рівень екологічної пластичності й адаптивності [18]. Результати наших досліджень показують, що фотосинтетичний потенціал досліджених гібриду та сортів кавуна залежить й від технології отримання посадкового матеріалу, на що вказують й інші дослідники [26]. Щеплення на гарбузі не лише підвищує біосинтез пігментів у рослин гібриду «Топган» та сорту «Вогник», але й зменшує діапазон їх міжстадійного коливання. Розсадний спосіб ефективніший за насіннєвий для сортів «Вогник» та «Топган». Ймовірно, застосування таких технологій у поєднанні із препаратами «Trevitan^{R}» і «Mikovit» дозволяє зменшити чутливість рослин до динаміки метеочинників упродовж вегетаційного сезону. Оскільки зазначають, що на стадії цвітіння і плодоношення стадії рослини кавуна звичайного є чутливими до дефіциту води і це часто спричинює абортацію квітів та опадання плодів [25]. Також є повідомлення, що тривале зниження температури значно сильніше гальмує фотосинтез у рослин

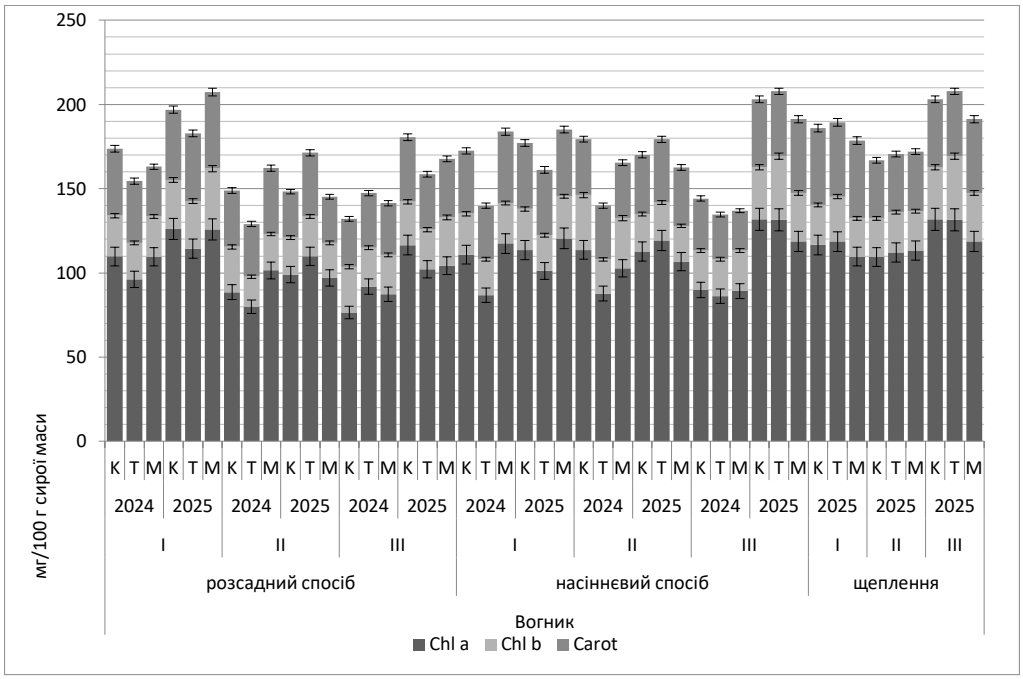


Рис. 2. Динаміка фотосинтетичних пігментів у листках рослин сорту «Вогник» упродовж вегетаційних сезонів 2024 р. і 2025 р. залежно від агротехніки вирощування. Умовні позначення: I – фаза активного росту; II – фаза цвітіння; III – фаза плодоношення; К – контроль, М – оброблення препаратом «Mikovit»; Т – оброблення препаратом «Trevitan^{R}».

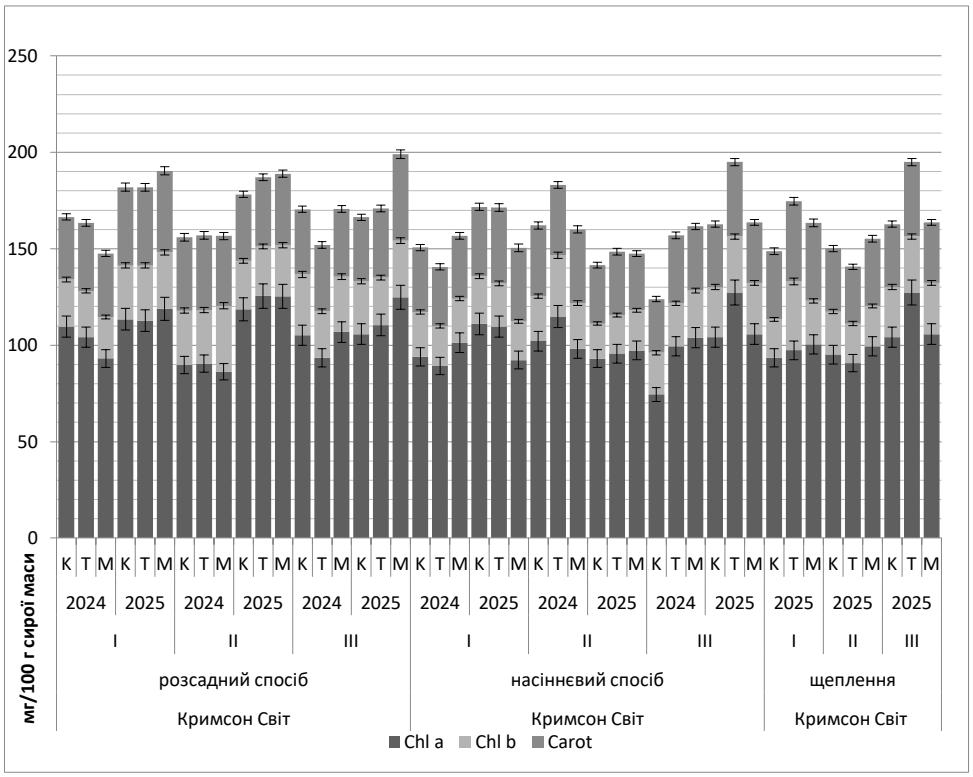


Рис. 3. Динаміка фотосинтетичних пігментів у листках рослин сорту «Кримсон Світ», упродовж вегетаційних сезонів 2024 р. і 2025 р. залежно від агротехніки вирощування. Умовні позначення: I – фаза активного росту; II – фаза цвітіння; III – фаза плодоношення; К – контроль, М – оброблення препаратом «Mikovit»; Т – оброблення препаратом «Trevitan^{R}»

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

кавуна, ніж її підвищення [8]. Застосування технології щеплення дозволяє значно підвищити стійкість рослин до низьких температур. Порівняння рослин насіннєвого та щепленого способу вирощування показало, що щеплені рослини демонструють високий та більш стабільний вміст пігментів упродовж вегетаційного періоду, що підтверджує результати досліджень інших дослідників [11], тоді як насіннєвий спосіб характеризується значними коливаннями залежно від варіанту обробки та стадії розвитку.

Застосування препаратів дозволяє стимулювання ростові процеси. Так, інші дослідники також зазначають про ефективність застосування рекультиванту «Trevitan^{R}» [30]. Застосування мікоризного препарату «Mikovit» (*Tuber melanosporum*) підвищує ріст, розвиток та стійкість рослин, ефективність засвоєння поживних речовин і води, а також покращує цвітіння, формування зав'язі та плодоношення. Це дозволяє підтримувати стабільну фотосинтетичну активність та ефективніше використовувати енергію світла для асиміляції, що підкреслює важливість симбіозу з мікоризними грибами для адаптації рослин до стресових умов. Отримані нами результати підкреслюють переваги симбіозу з мікоризними грибами для оптимізації агротехнічних показників і підвищення адаптивного потенціалу рослин у різних умовах вирощування, які збігаються із результатами інших дослідників [13]. Також було продемонстровано, що симбіоз АМ впливає на адаптивний потенціал таких рослин, як кукурудза, конюшина, помідори, огірки та салат [2].

Таким чином, отримані дані обґрунтовують вплив як агротехнічного способу вирощування, так і застосованих препаратів на накопичення фотосинтетичних пігментів у сорту Вогник. Стабілізація та підвищення вмісту пігментів, особливо у фазі плодоношення, досягається використанням препаратів Варіанту 2, тоді як Варіант 1 помірно регулює динаміку пігментів, що може бути важливим для оптимізації продуктивності та якості рослин під час вегетаційного періоду.

Досліджувані рослини кавуна звичайного *(Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum. & Nakai*)* мають велику пластичність до ґрунтово-кліматичних умов вирощування та широкий ареал – від тропічних, пустельних і напівпустельних кліматичних зон до помірних широт. Але сучасна агротехніка дає можливість скоригувати умови, які є сприятливими для повноцінного вирощування кавуна звичайного в умовах Західних областей України. Динаміка вмісту пігментів у рослинному організмі характеризує потенційну потужність фотосинтетичного апарату впродовж вегетаційного періоду, є однією із провідних характеристик фотосинтетичної активності та продукційного процесу сільськогосподарських культур і, як генетично детермінована ознака, може змінюватися залежно від низки умов, у тому числі й агротехнічних заходів, зокрема застосування біологічно активних речовин [8;17;32].

Отже, результати досліджень свідчать про комплексну залежність накопичення фотосинтетичних пігментів у рослин *(Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum. & Nakai) від року вирощування, способу отримання рослин та впливу препаратів, що використовувалися. Рекультивант «Trevitan^{R}» виявив стійкий стимулюючий ефект, особливо у фазі цвітіння, тоді як «Mikovit» забезпечував підвищення пігментів на різних стадіях залежно від умов року. Отримані дані підкреслюють важливість врахування агротехнічних факторів при оптимізації технології вирощування кавунів для підтримання високого рівня фотосинтетичної активності.

Література

1. Arief M.A.A., Kim H., Kurniawan H., Nugroho A.P., Kim T., Cho B.K. Chlorophyll Fluorescence Imaging for Early Detection of Drought and Heat Stress in Strawberry Plants. *Plants.* 2023. Vol 12, № 6. 1387. https://doi.org/10.3390/plants12061387.
2. Bahadur A., Batool A., Nasir F., Jiang S., Mingsen Q. Mechanistic Insights into Arbuscular Mycorrhizal Fungi-Mediated Drought Stress Tolerance in Plants. *International Journal of Molecular Sciences*. 2019. Vol. 20, №7. https://doi.org/10.3390/ijms20174199.
3. Devi P., Perkins-Veazie P., Miles C. Impact of grafting on watermelon fruit maturity and quality. *Horticulturae.* 2020. № 6. P. 97. https://www.mdpi.com/2311-7524/6/4/97.
4. Fahad S., Bajwa, A. A., Nazir U., Anjum, S. A., Farooq A., Zohaib A. Crop production under drought and heat stress: plant responses and management options. *Frontiers in Plant Science.* 2017. Vol. 8. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01147.
5. Freeman J. H., Miller G., Olson S., Stall W. Diploid Watermelon Pollenizer Cultivars Differ with Respect to Triploid Watermelon Yield. *HortTechnology*. 2007. Vol. 17, № 4. P. 518–522. https://doi.org/10.21273/HORTTECH.17.4.518.
6. Hannachi S., Signore A., Adnan M., Mechi L. Single and Associated Effects of Drought and Heat Stresses on Physiological, Biochemical and Antioxidant Machinery of Four Eggplant Cultivars. *Plants (Basel).* 2022. № 11(18). doi: 10.3390/plants11182404. PMID: 36145805.
7. Hiscox J. D., Israelstam G. F.. A method for the extraction of chlorophyll from leaf tissue without maceration. *Canadian Journal of Botany.* 1979. Vol. 57, № 12. P. 1332-1334. https://doi.org/10.1139/b79-163.
8. Hou W., Sun A.H., Chen H.L., Yang F.S., Pan J.L., Guan M.Y. Effects of chilling and high temperatures on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in leaves of watermelon seedlings. Biologia plantarum. 2016. № 60. P. 148-154. https://doi.org/10.1007/s10535-015-0575-1.
9. Lichtenthaler H.K. Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *ScienceDirect. Methods in Enzymology.* 1987. Vol. 148. P. 350-382.https://www.sciencedirect.com/science/chapter/bookseries/abs/pii/0076687987480361?via%3Dihub#preview-section-cited-by.

10. Malambane G., Madumane K., Sewelo L.T., Batlang U. Drought stress tolerance mechanisms and their potential common indicators to salinity, insights from the wild watermelon (*Citrullus lanatus*): A review. *Front. Plant Sci.* 2023. Vol. 13. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1074395.
11. Mashilo J., Shimelis H., Contreras-Soto R. I., Ngwepe R. M. A meta-analysis on rootstock-induced effects in grafted watermelon (Citrullus lanatus var. lanatus). *Scientia Horticulturae*. 2023. Vol. 319. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112158 .
12. Meru G., McGregor, C. E. A Genetic Locus Associated with Resistance to Fusarium oxysporum f. sp. niveum Race 2 in Citrullus lanatus-type Watermelon. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 2016. Vol. 141, №6. P. 617–622. https://doi.org/10.21273/JASHS03890-16 .
13. Mo Y., Wang Y., Yang R., Zheng J., Liu C., Li H., Ma J., Zhang Y., Wei C., Zhang X. Regulation of Plant Growth, Photosynthesis, Antioxidation and Osmosis by an Arbuscular Mycorrhizal Fungus in Watermelon Seedlings under Well-Watered and Drought Conditions. *Frontiers in Plant Science.* 2016. Vol. 7. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00644.
14. Mondal K., Kar RK., Chakraborty A., Dey N.3. Concurrent effect of drought and heat stress in rice (*Oryza sativa* L.): physio-biochemical and molecular approach. *Biotech*. 2024. Vol. 14, № 5. doi: 10.1007/s13205-024-03980-1. Epub 2024 Apr 19.PMID: 38645792Free PMC article.
15. Morales C., Riveros-Burgos C., Espinoza Seguel F., Maldonado C., Mashilo J., Pinto C., Contreras-Soto R.I. Rootstocks Comparison in Grafted Watermelon under Water Deficit: Effects on the Fruit Quality and Yield. *Plants.* 2023. №12. P. 509. https://doi.org/10.3390/plants12030509.
16. Okon O., Matrood, A., Okon, J. Na+ exclusion and Na+/K+ ratio adjustment by mycorrhiza enhances macro/micro nutrients uptake in two members of Cucurbitaceae family under salt stress. *International Journal of Botany Studies*. 2020. VoI. 5. P. 108–114.
17. Ren K.,Tang T., Kong W., Su Y., Wang Y., Cheng H., Yang Y., Zhao X. Response of Watermelon to Drought Stress and Its Drought-Resistance Evaluation. *Plants.* 2025. Vol. 14. P. 1289. https://doi.org/10.3390/plants1409128.
18. Serhiienko O. V., Shabetia O. M., Linnik Z. P., Serhiienko M. B., Povlin I. Ye. Selection of watermelon starting material by adaptability for breeding for suitability for intensive and organic growing technologies. *Селекція і насінництво*. 2023. Вип. 124. С. 45–55.
19. Sewelo L.T., Madumane K., Nkane M.N., Tait M., Malambane G. Potential Use of Compatible Osmolytes as Drought Tolerance Indicator in Local Watermelon (Citrullus lanatus) Landraces. *Horticulturae*. 2024. № 10. P. 475. https://doi.org/10.3390/horticulturae10050475.
20. Silva D.M.R., Barros A.C., Silva R.B. et al. Impact of Photosynthetic Efficiency on Watermelon Cultivation in the Face of Drought. *Agronomy.* 2024. Vol. 14. P. 950. https://doi.org/10.3390/agronomy14050950.
21. Souahi H. Impact of lead on the amount of chlorophyll and carotenoids in the leaves of T. durum and T. aestivum, Hordeum vulgare and Avena sativa. *Bio. Divers*. 2021. Vol. 29, № 3. P. 207—210. https://doi.org/10.15421/012125.
22. Tlevlessova D., Medvedkov Y., Kairbayeva A., Nazymbekova A. Mechanisation of the primary processing of watermelons without destroying the rind. *Food Science and Technology.* 2023. Vol. 43. № 16. https://doi.org/10.1590/fst.86622.
23. Toscano S., Trivellini A., Cocetta G., Bulgari R., Francini A., Romano D. Effect of preharvest abiotic stresses on the accumulation of bioactive compounds in horticultural produce. *Frontiers in Plant Science.* 2019. Vol. 10. doi: 10.3389/fpls.2019.01212.
24. Ulas A., Doganci E., Ulas F., Yetisir H. Root-growth characteristics contributing to genotypic variation in nitrogen efficiency of bottle gourd and rootstock potential for watermelon. *Plants*. 2019. № 8, P. 77. https://www.mdpi.com/2223-7747/8/3/77.
25. Wehner T.C. Watermelon. Vegetables I. *Handbook of Plant Breeding*. 2008. New York. Vol 1. P. 381-318. https://doi.org/10.1007/978-0-387-30443-4_12.
26. Yanjuan Y., Li Y., Liping W., Shirong G. Bottle gourd rootstock-grafting promotes photosynthesis by regulating the stomata and non-stomata performances in leaves of watermelon seedlings under NaCl stress. *Journal of Plant Physiology.* 2015. Vol. 186–187. P. 50–58. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jplph.2015.07.013.
27. Yetişir H., Sari N. Fruit and Seed Yields of Watermelon Citrullus lanatus (Thunb.) Matsum. and Nakai Grafted onto Different Bottle Gourd (Lagenaria siceraria Molina Standl.) Rootstocks. *Asian Journal of Research in Agriculture and Forestry.* 2018. №1. P. 1–9.
28. Zhang Y., Yao Q., Li J., Wang Y., Liu X., Hu Y. Contributions of an arbuscular mycorrhizal fungus to growth and physiology of loquat (Eriobotrya Japonica) plants subjected to drought stress. *Mycological Progress*. 2015. Vol. 14. P. 1–11. https://link.springer.com/article/10.1007/s11557-015-1108-1.
29. Вінниччина стала лідером з вирощування кавунів в умовах війни. https://zemliak.com/news/zemlya/5351-vinnichchina-stala-liderom-z-viroshchuvannya-kavuniv-v-umovah-viyni?utm (дата звернення 26.04.2026).
30. Дзендзель А. Ю., Пида С. В. Рекультивант композиційний Trevitan™ – новий комплексний препарат для обробки насіння і посадкового матеріалу. *Еко Форум – 2021. Тези доп. V спеціалізованого міжнародного Запорізького екологічного форуму* (14 – 16 вересня 2021 р.).Запоріжжя : Запорізька торгово-промислова палата, 2021. С. 45-46.
31. Закарпатські кавуни: чи дочекаємося і на які ціни варто розраховувати? https://kiszo.news/2023/06/13/ (дата звернення 24.04.2026).
32. Калитка В. В. Вплив регулятора росту АКМ на пігментний комплекс та фотосинтетичну продуктивність рослин помідора. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України.* Сер. : Агрономія. 2013. Вип. 183(1). С. 72-77. http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau_agr_2013_183%281%29__15 .
33. На Львівщині у теплицях вирощують кавуни. https://www.jagodnik.info/na-lvivshhyni-u-teplytsyah-vyroshhuyut-kavuny/ (дата звернення 22.04.2026).
34. Семенченко О.Л, Мельник О. В., Заверталюк В. Ф., Заверталюк О. В. Особливості формування насіннєвої продуктивності кавуна звичайного в ущільнених посівах. *Зернові культури*. 2021. Т. 5, № 1. С. 38-44. http://dspace.dsau.dp.ua/jspui/handle/123456789/6391.
35. Сергієнко О.В., та Ліннік З.П. Адаптивний потенціал колекції гібридів кавуна F1 за продуктивними показниками та вегетаційним періодом. *Овочівництво та баштанництво*. 2023. № 72. С. 32-40. https://doi.org/10.32717/0131-0062-2022-72-32-40.

36. Фермери з Куп'янська вирощують кавуни в нетипових умовах на Івано-Франківщині. https://superagronom.com/news/21147--fermeri-z-kupyanska-viroschuyut-kavuni-v-netipovih-umovah-na-ivano-frankivschini (дата звернення 17.04.2026).
37. Як харківські фермери вирощують кавуни на Прикарпатті. *Економічна правда.* https://epravda.com.ua/biznes/tut-horoshiy-plyus-yak-harkivski-fermeri-viroshchuyut-kavuni-na-prikarpatti-809898/ (дата звернення 26.04.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 29.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 553.632:550.83.045:550.831(477.86)
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.22

ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЇХ ДОСЛІДЖЕННЯ НА ВІДПРАЦЬОВАНИХ СОЛЯНИХ РОДОВИЩАХ КАРПАТСЬКОГО РЕГІОНУ

Багрій С.М., Новосільський М.В.
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, 76019,м. Івано-Франківськ
gbg2020@ukr.net , mar.novos.ua@gmail.com

Розглянуто екологічні проблеми територій Калуського, Стебницького та Солотвинського соляних родовищ Карпатського регіону та шляхи запровадження еколого-геологічного моніторингу в постмайнінговий період. Видобуток калійної та кам'яної солі на Калуському родовищі здійснювався шахтним та кар'єрним способом, а на Стебницькому та Солотвинському тільки шахтним. Основними еколого-геологічними проблемами, які виникли після припинення виробництва калійної та кам'яної солі практично на всіх родовищах Карпатського регіону, є наступні. Гідрогеологічні – неконтрольоване наповнення Домбровського кар'єру на Калуському родовищі та забруднення підземних вод різними хімічними елементами на всіх родовищах. Гідромеханічні – контрольоване або неконтрольоване заповнення відпрацьованих шахтних полів ненасиченими розсолами з подальшим розчиненням міжкамерних циликів. Гідрологічні – забруднення поверхневих водотоків у межах басейнів рік Дністер і Тиса. Геомеханічні – осідання та провали земної поверхні, які утворюються на шахтних полях за рахунок наявності видобувних камер, деформацій гірничого масиву та розущільнення гірських порід. У відповідності до зазначених проблем сформульовані задачі та етапи екологічних досліджень у частині геологічних, геофізичних, гідрогеологічних та топогеодезичних спостережень та комплексного їх опрацювання. Як приклад наведено деталізований огляд геофізичних робіт та продемонстровано можливості геофізики на всіх етапах розвязування тих чи інших еколого-геологічних задач. Результати еколого-геологічних моніторингових досліджень розглядаються як вихідні дані для формулювання заходів щодо запобігання надзвичайних ситуацій і прийняття управлінських проектних рішень та їх реалізації. *Ключові слова:* еколого-геологічний моніторинг, соляні родовища, забруднення підземних вод, режимні спостереження, геофізичні дослідження.

Environmental problems and results of their research at worked salt deposits in the Carpathian region, Bagriy S., Novosilskyi M.

The environmental problems of the Kalush, Stebnyk, and Solotvyno salt deposits of the Carpathian region, as well as approaches to implementing environmental–geological monitoring in the post-mining period, are examined. Potash and rock salt extraction at the Kalush deposit was carried out using both underground and open-pit methods, whereas at the Stebnyk and Solotvyno deposits it was conducted exclusively by underground mining. The principal environmental–geological problems that have arisen following the cessation of potash and rock salt production at virtually all deposits in the Carpathian region are as follows. **Hydrogeological:** uncontrolled flooding of the Dombrovskyi open pit at the Kalush deposit and contamination of groundwater by various chemical elements at all deposits. **Hydromechanical:** controlled or uncontrolled filling of mined-out underground workings with undersaturated brines, followed by dissolution of interchamber pillars. **Hydrological:** contamination of surface watercourses within the Dniester and Tisza river basins. **Geomechanical:** land subsidence and surface collapses occurring over mined areas due to the presence of extraction chambers, deformation of the rock mass, and loosening of rocks. In accordance with these issues, the objectives and stages of environmental investigations are formulated, including geological, geophysical, hydrogeological, and topographic–geodetic observations and their integrated processing. As an example, a detailed review of geophysical surveys is provided, demonstrating the capabilities of geophysics at all stages of solving various environmental–geological problems. The results of environmental–geological monitoring are considered as baseline data for developing measures aimed at preventing emergencies, as well as for supporting management and engineering decision-making and their implementation. *Key words:* ecological and geological monitoring; salt deposits; groundwater contamination; monitoring observations; geophysical surveys.

Актуальність дослідження. Карпатський регіон є єдиним басейном України, в якому розвідано значні поклади калійних і кам'яних солей: Калуське (Івано-Франківська обл.), Стебницьке (Львівська обл.) та Солотвинське (Закарпатська обл.) родовища. За різноманітністю і співвідношенням присутніх тут соляних мінералів ці відклади є унікальними й не мають аналогів у світі. Видобуток та переробка калійно-магнієвих руд дозволяла до 2000 р. не лише забезпечувати власні потреби України комплексними сульфатними калійно-магнієвими добривами, а й експортувати їх на зовнішній ринок.

© Багрій С.М., Новосільський М.В., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

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

Однією з причин, які призвели до руйнації калійної промисловості, є неефективне вирішення екологічних проблем надрокористування, що виникли в процесі недосконалих технологій консервації та ліквідації гірничодобувного і переробного комплексу (збільшення площі гірничих робіт, вилучення солей і порід, втрата фільтраційної ізольованості гірничого простору). Наприклад, при видобутку калійно-магнієвих руд на рудниках Калуша утворилось 17,5 млн. м^3 пустот. На родовищі спостерігаються прориви до солепородного масиву прісних (агресивних) вод із поверхні, що призводить до порушення рівноваги надр з утворенням провальних воронок, карстових порожнин і деградації джерел господарсько-питного водопостачання.

Надзвичайна ситуація на території родовища кам'яної солі в смт. Солотвине проявилася у затопленні трьох діючих соляних шахт і утворенні величезних проваль на земній поверхні. Довготривала експлуатація покладів калійної солі на Стебницькому калійному родовищі камерним способом призвела до утворення штучних порожнин загальним об'ємом біля 13,5 млн. м^3. Експлуатація рудників призвела до витоків розсолів у камери і до активізації карстових процесів, що супроводжується деформацією земної поверхні. У 1983 р. унаслідок прориву дамби хвостосховища та витоку близько 5 млн м^3 високомінералізованих розсолів в р. Дністер було тимчасово припинено питне водопостачання м. Одеса. Наразі загроза забруднення джерел питного водопостачання басейну р. Тиса та Дністровського басейну істотною мірою визначається неконтрольованим затопленням шахт та витоком розсолів із концентрацією 60–450 г/дм^3 у річкову мережу. Таким чином, у межах солевидобувного комплексу Карпатського регіону формується надзвичайна ситуація транскордонного характеру.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Карпатські соляні родовища не є винятком щодо розвитку природно-техногенного карсту. На значній кількості родовищ світу відзначалась невідповідність геологічних та гідрогеологічних моделей, покладених в основу проектних рішень, реальній ситуації. Огляд аварій на рудниках солі в Німеччині, Україні наведено у монографії [1]. Щодо соляних родовищ України, то окремі розрахункові схеми стійкості гірничих масивів із прогнозом аварій наведено насамперед у звітах із науково-дослідних робіт фахівців ТзОВ "Інститут "Гірхімпром" (Львів). Результативну частину цих звітів відображено в опублікованих працях [1, 2]. До цих робіт треба теж зарахувати необхідні дослідження щодо гідрогеологічних умов та деформації земної поверхні [4, 9]. Геофізичні методи дають змогу виокремити та вирішити окремі завдання, пов'язані із констатацією стану гірничого масиву на певних стадіях його деградації. [3, 5 – 8, 10 - 12].

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є окреслення шляхів запровадження еколого-геологічного моніторингу, як основи подальшого розроблення та реалізація науково-обгрунтованої системи заходів щодо нейтралізації екологічних загроз, які виникли внаслідок техногенно спричинених порушень геологічного середовища в процесі розроблення та постмайнінгу соляних родовищ Карпатського регіону та впровадження заходів щодо запобігання ураження геологічного середовища, забруднення підземних і поверхневих вод, погіршення сейсмогеофізичної стійкості солепородного масиву та об'єктів критичної інфраструктури.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

− розроблення та впровадження системи моніторингу деформації земної поверхні на території шахтних полів;

− режимні спостереження рівнів та хімічного складу підземних і поверхневих вод з метою прогнозування динаміки цих процесів;

− моделювання та прогнозування розвитку небезпечних еколого-геологічних процесів в зоні затоплення гірничо-добувних об'єктів соледобувного комплексу Карпатського регіону (шахт, кар'єру, дренажних споруд).

Наукова новизна результатів дослідження. Вперше розроблені наукові основи геоекологічного моніторингу, який базується на комплексі геологічних, геодезичних, гідрогеохімічних, гідрологічних та геофізичних методах дослідження навколишнього середовища на прикладі калійних родовищ Передкарпаття в постмайновий період.

Методологія дослідження. Методологія досліджень базується на комплексному аналізі даних геохімічних, геофізичних, гідрогеологічних, інженерно-геологічних, гідрогеохімічних досліджень складу та показників стійкості геологічного середовища зі застосуванням геостатистичних та геоінформаційних технологій з позицій сталого розвитку та екологічної безпеки. Теоретичні узагальнення здійснюються на основі законів розвитку природи та суспільства за аналітичними результатами просторово-часового моніторингу стану природно-техногенних об'єктів довкілля.

При виконанні реалізовано наступні етапи досліджень:

− збір, верифікація та узагальнення даних попередніх досліджень у часовому розрізі з позицій хімічної термодинаміки;

− емпіричне обстеження інженерно-геотехнічного стану об'єктів критичної інфраструктури;

− гідрогеохімічне обстеження поверхневих водних об'єктів та надсольових підземних водоносних горизонтів як джерел підземного стоку транскордонних річкових басейнів у моніторинговому режимі;

− геофізичні дослідження техногенних порушень солепородних масивів та ділянок формування і розвитку небезпечних геологічних процесів (деформації земної поверхні, карстові провали);

– просторово-часова оцінка змін геодинамічного стану геологічних структур методами дистанційного зондування землі;

– формування баз даних гідрогеохімічних, санітарно-гігієнічних показників якості води, геофізичних показників порушеності геологічного середовища з урахуванням власних результатів та попередніх досліджень;

– аналіз динаміки змін хімічного складу поверхневих і підземних вод у зоні техногенних порушень гідрогеофільтраційних полів з позицій хімічної кінетики та термодинаміки. Визначення параметрів швидкості міграції забруднюючих речовин;

– прогнозування обсягів розвантаження мінералізованих вод у транскордонний річковий стік рр. Дністра і Тиси. Геоінформаційний аналіз гідрогеохімічних даних. Прогнозування карстопровальних процесів та деформацій земної поверхні за даними геолого-геофізичних досліджень та геодезичних спостережень.

Результати досліджень. Усі три зазначені вище соляні родовища розташовані в західній частині України (рис. 1). За віком соляні поклади є неогенові. Розвідані на глибину 600 м. Вміщуючі є теригенні породи: пісковики, аргіліти, алевроліти та глини.

Розглянемо наявні результати по територіях окремих родовищ у відповідності до сформульованих проблем. При цьому зазначимо, що на даний час обґрунтовані методи вирішення еколого-геологічних задач для кожного об'єкта кожного гірничопромислового району (ГПР) та сформульовані основні отримані результати, як база подальших моніторингових досліджень.

Надалі наведемо результати досліджень для основних об'єктів Калуського гірничопромислового району. Ці результати є методологічною основою для подальшого еколого-геологічного моніторингу.

Домбровський кар'єр.

Створено цифрову 3Д модель кар'єру з урахуванням динаміки його наповнення розсолами у відповідності до рівневого режиму в ретроспективі та перспективі. Відібрано проби розсолів на основі їх хімічного аналізу встановлено наявні та прогнозні рівні мінералізації, а також забруднення різними хімічними елементами, зокрема важкими металами. Розраховано критичні умови спрямованості розсолів кар'єру у водоносний горизонт у відповідності

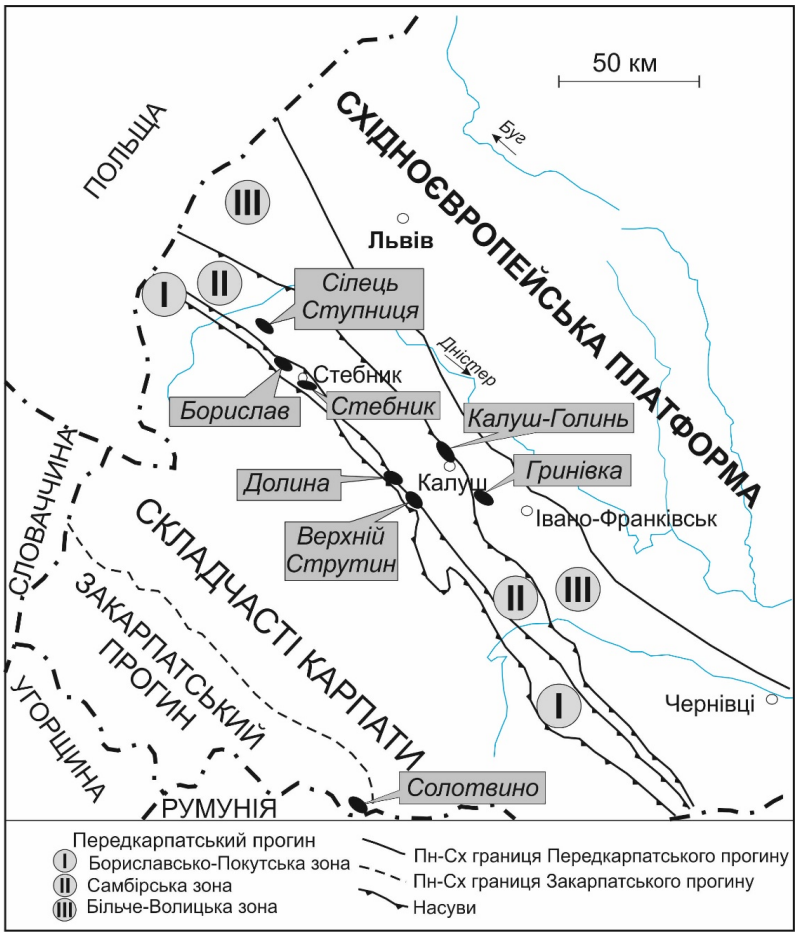


Рис. 1. Розташування родовищ та солепроявів в західній частині України

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

до рівня розсолів. Визначено оптимальний комплекс геофізичних досліджень з подальшим визначенням на результативній базі критерію імовірнісного розвитку техногенного карсту та втрати стійкості бортів кар'єру.

Площа засолення водоносного горизонту та підтоплення території.

Визначено динаміку наповнення розсолом Домбровського кар'єру по глибині та площі. Налагоджено систему режимних спостережень рівнів та мінералізації підземних вод по існуючих свердловинах, здійснено побудову та аналіз результативних карт, а також виконано балансові гідрогеологічні розрахунки. Встановлено кореляційні зв'язки ступеня засолення підземних вод та геофізичних параметрів, побудовано режимні карти засолення за даними геофізичних спостережень. Здійснено розрахунок за наявними гідрогеологічними та гідрогеохімічними моделями можливого потенційного забруднення р. Дністер та окремих його приток.

Відпрацьовані шахтні поля рудників «Калуш», «Нова-Голинь» та «Голинь».

Відновлено мережу опорних геодезичних реперів, здійснено режимні геодезичні спостереження, встановлено закономірності просідання земної поверхні у відповідності до встановлених стадій деформацій. Визначено оптимальний комплексу геофізичних спостережень у межах мульд осіданння земної поверхні. Напрацьовано методику обробки та комплексної інтерпретації геолого-геофізичних даних у задачах встановлення ступеня деградації земної поверхні та прогнозування розвитку деформацій. Детальний розгляд зазначених вище досліджень за своїм об'ємом є предметом принаймні монографії. Тому надалі розглянемо більш детально деякі вибіркові результати. На рис. 2 як приклад наведено окремі фрагменти досліджень на території Калуш-Голинського родовища калійної солі.

Об'єкти Калуського гірничопромислового району зображені в центральній частині рисунка. Овальну форму має Домбровський кар'єр з огороджуючою дамбою; прямокутну форму – хвостосховища, що заповнені розсолами. Зі східного боку до кар'єру прилягають солевідвали. У західній та південній частині блідо-синім кольором позначені території шахтних полів. Червоні плями – ділянки прогнозованих провалів. По контуру рисунка зображені результати геолого-геофізичних та геодезичних досліджень, як складової еколого-геологічного моніторингу. Тривимірні зображення у верхній частині рис. 2 демонструють розвиток аномальних зон розущільнення напрямку інфільтрації по глибині, а також ступінь розмиву соляного дзеркала з часом.

Методи зондування становленням електромагнітного поля (ЗС) та вертикального електричного зондування (ВЕЗ) наведені в південній частині слайду та демонструють наявний стан міжкамерних цілків відпрацьованого шахтного. Фрагменти лівої частини демонструють можливості картування розвитку карстових форм (як наслідок розущільнення гірських порід) та відображення цього процесу в тривимірному зображенні (за даними високоточної гравіметрії та режимних топогеодезичних спостережень).

Фрагменти правої частини рисунку демонструють кастопрояви на північному борті Домбровського кар'єру та прогнозні моделі цих форм по площі. Критерій ймовірності карстопроявів розраховано за комплексом геофізичних методів, а саме вертикаль-

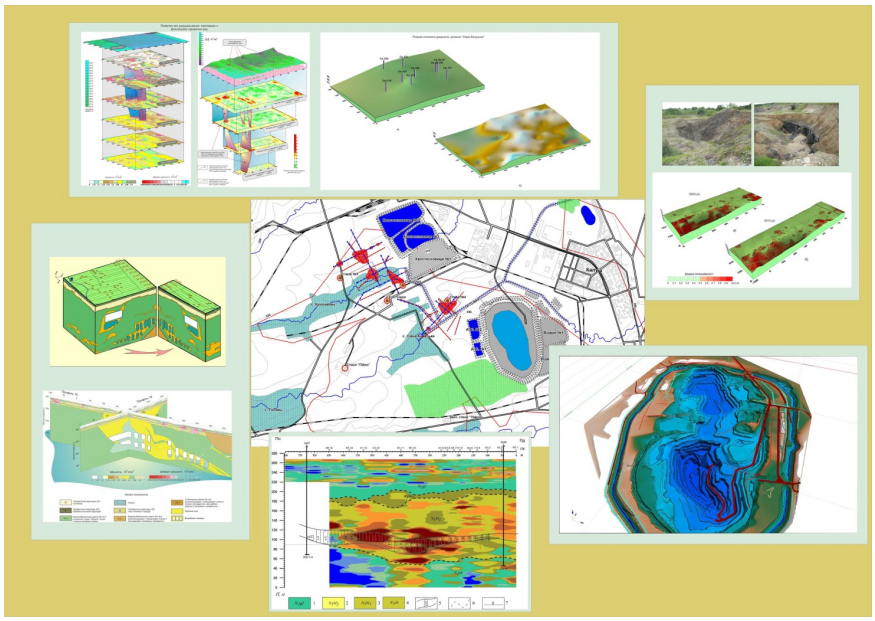


Рис. 2. Комплексний еколого-геологічний моніторинг Калуш-Голинського родовища калійної солі

них електричних зондувань, природного імпульсного електромагнітного поля Землі та природного електричного поля.

Висновки

1. Порушення технології видобутку як відкритим, так і шахтним способом, недосконала технологія консервації та ліквідації гірничо-видобувного та переробного комплексу призвела до виникнення екологічних проблем пов'язаних із природно-техногенним порушенням гірничого масиву та значною деформацією земної поверхні, забрудненням поверхневих та підземних вод, забрудненням гідрологічної системи в межах басейнів рік Дністер та Тиса.

2. Запропоновані моніторингові дослідження по кожному з названих соляних родовищ є в певній мірі ідентичними в силу подібності геологічних умов і типу корисних копалин. Ступінь їх реалізації є найбільш повною на Калуш-Голинському родовищі, яке відрізняється від інших наявністю як відкритого, так і шахтного способу видобутку і тому варте першочергової уваги.

3. Серед методів моніторингу на Калуш-Голинському родовищі задіяні наступні: топо-геодезичні, геофізичні, гідрогеохімічні, гідрогеологічні. Реалізація комплексу зазначених методів надала можливість вирішення наступних задач: спостереження та оцінка стану деформації масиву гірських порід і видобувних камер, а також визначення та прогнозу стадії просідань та провалів земної поверхні; наявна та прогнозна оцінка забруднення водного середовища; оцінка балансових складових поверхневих і підземних вод з урахуванням динаміки їх об'ємів та забруднення з подальшим розрахунком можливого забруднення річкових басейнів.

5. Комплексні моніторингові спостереження дають змогу як у поточний момент, так і в перспективі приймати обґрунтовані управлінські рішення щодо запобігання надзвичайним ситуаціям техногенного характеру, а також забезпечують своєчасне виявлення негативних змін у геологічному середовищі, оцінку рівня техногенного навантаження та прогнозування розвитку небезпечних процесів. Це, у свою чергу, сприяє підвищенню рівня екологічної безпеки територій, мінімізації ризиків для населення і об'єктів інфраструктури та оптимізації природокористування в постмайнінговий період.

Література

1. Гайдін А. М., Рудько Г. І. Техногенний карст : монографія. Київ, 2016. 200 с.
2. Гайдін А. М., Дяків В. О., Чікова І. В. Деформації земної поверхні в зоні діяльності калійних рудників у Стебнику. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2014. № 2. С. 112–119.
3. Багрій С. М. Геофізичний моніторинг геологічного середовища в межах родовищ калійної солі (на прикладі Калуш-Голинського родовища) : дис. … канд. геол. наук : 04.00.22. Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. Івано-Франківськ, 2016.
4. Бурак К. О., Кузьменко Е. Д., Багрій С. М., Гринішак М. Я., Мельниченко Г. Г., Михайлишин В. П., Ковтун В. М. Особливості геодезичного моніторингу та прогнозування геотехногенної динаміки на шахтних полях калійних родовищ. *Вісник геодезії та картографії.* 2014. № 5. С. 12–18. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vgtk_2014_5_9 (дата звернення: 29.04.2026).
5. Bagriy S., Kuzmenko E., Motkalyk A. Prediction of karst cave-in processes at the Solotvyno rock salt deposit applying geophysical methods. *16th International Conference Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects.* 2017. DOI: 10.3997/2214-4609.201701892.
6. Максимчук В. Ю., Сапужак О. Я., Дещиця С. А., Романюк О. І., Підвірний О. І., Коляденко В. В., Тимощук В. Р. Оцінка карстопровальної небезпеки у межах Стебницького калійного родовища методами електророзвідки. *Геодинаміка.* 2019. № 1(26). С. 76–89. DOI: https://doi.org/10.23939/jgd2019.01.076.
7. Дещиця С., Підвірний О., Романюк О., Садовий Ю., Коляденко В., Савків Л., Мищишин Ю. Оцінка стану екологічно проблемних об'єктів Калуського гірничопромислового району електромагнітними методами та їх моніторинг. *Наука та інновації*. 2016. № 12(5). С. 47–59. DOI: https://doi.org/10.15407/scin12.05.047.
8. Hurska N., Bagriy S., Davybida L., Kuzmenko E., Fitsak I. Spatial modeling and prediction of environmental situation in the filling Dombrowski career. *14th EAGE International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*. 2015. DOI: 10.3997/2214-4609.201412365.
9. Павлюк В. І. Природні фактори активізації екзогенних процесів на техногенно порушених ділянках поширення соленосних відкладів Передкарпаття. *Геодинаміка.* 2016. № 1(20). С. 94–105. DOI: https://doi.org/10.23939/jgd2016.01.095.
10. Kuzmenko E. D., Maksymchuk V. Y., Bagriy S. M., Sapuzhak O. Y., Chepurnyi I. V., Dzoba U. O. On the relevance of using a complex combination of NIEMFE and EM methods in forecasting rock deformation. *17th International Conference Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects.* 2018. DOI: 10.3997/2214-4609.201801820.
11. Malkova Y., Dolin V., Yakovlev Y. Formation regularities of liquid body of Dombrovsky quarry. *Geoinformatics 2020 – XIXth International Conference "Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*. 2020. DOI: https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo079.
12. Kuzmenko E., Bahrii S., Dzoba U. The depth range of the Earth's natural pulse electromagnetic field (ENPEMF). *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2019. Vol. 27, No. 3. P. 466–477. DOI: https://doi.org/10.15421/111870.
13. Шуровський О. Д., Анікеєв С. Г., Шамотко В. І., Дещиця С. А., Ніколаєнко О. А., Поплюйко А. Г. Геофізичний моніторинг еконебезпечних геологічних процесів в агломерації м. Калуша. *Мінеральні ресурси України*. 2012. № 2. С. 31–38.

Дата першого надходження статті до видання: 29.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

UDC 504.3.054:66.074.5.097
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.23

DEVELOPMENT OF CATALYTIC MATERIALS BASED ON NANOSTRUCTURED INTERMETALLICS FOR SOLVING ENVIRONMENTAL PROBLEMS OF THE COKE-CHEMICAL INDUSTRY

Belokon K.V.
Zaporizhzhia National University
Universytetska St., 66, 69600, Zaporizhzhia
kv.belokon@gmail.com

The paper presents the results of the development and testing of highly efficient polymetallic Fe-Al catalysts designed for the deep oxidation of hydrocarbons in industrial emissions. The relevance of the study is driven by the necessity to replace noble metal-based catalysts in catalytic units with more affordable and thermally stable analogues. Intermetallic precursors of the stoichiometric composition $FeAl_3$ were synthesized using the thermal self-ignition method. The activation of the precursors was carried out via aluminum leaching, which ensured a significant increase in the specific surface area, reaching 74.3 m^2/g. The introduction of nickel into the precursor composition promotes the formation of a more finely dispersed microstructure, directly resulting in an increased specific surface area and enhanced corrosive and thermal stability of the catalytic system. In the processing of resins or organic emissions (benzene, phenol, naphthalene), iron often triggers coke formation; however, nickel facilitates the gasification of carbon deposits, thereby extending the catalyst's service life. It was established that the addition of cobalt (15 wt. %) radically enhances catalytic activity, ensuring 95% hydrocarbon conversion at a temperature of 350°C. Manganese alloying determines the formation of a nanostructured surface in the form of hexagonal plates and star-shaped clusters, which significantly increases the accessible active surface area and intensifies the catalytic process. It was established that doping with copper (3 wt. %) and zirconium (1 wt. %) ensures the stabilization of the microstructure and inhibits crystallite growth, resulting in increased mechanical strength and an extended service life of the catalyst in aggressive gas environments. It has been experimentally confirmed that the developed catalyst composition, Fe-Ni-Co-Mn-Cu-Zr (41-33-15-12-3-1 wt. %), ensures high detoxification efficiency of toxic components under the actual gas environment conditions of coke-chemical production. Pilot-scale tests conducted under the actual conditions of a tar distillation shop confirmed the high efficiency of the development. At high inlet concentrations of pollutants (specifically benzene – 40.38 mg/m^3, phenol – 15.38 mg/m^3, and naphthalene – 179.56 mg/m^3), the detoxification efficiency for phenol, benzene, and naphthalene reached 99.0-99.8%. The obtained results comply with the maximum permissible emission standards, allowing for the recommendation of the developed catalyst for implementation at enterprises within the coke-chemical and metallurgical industries. *Key words:* intermetallic catalysts, iron-aluminum alloys, thermal self-ignition method, leaching, specific surface area, nanostructure, deep oxidation, hydrocarbons, environmental safety, coke-chemical production, gas emissions, phenol, benzene, naphthalene.

Розробка каталітичних матеріалів на основі наноструктурованих інтерметалідів для вирішення екологічних проблем коксохімічного виробництва. Бєлоконь К.В.

У роботі представлено результати розробки та випробування високоефективних поліметалевих Fe-Al каталізаторів, призначених для глибокого окиснення вуглеводнів у промислових викидах. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю заміни каталізаторів на основі дорогоцінних металів в каталітичних установках на більш доступні та термічно стійкі аналоги. Були синтезовані сплави методом теплового самозапалювання, що дозволило отримати інтерметалідні прекурсори стехиометрического состава $FeAl_3$. Процес активації прекурсорів здійснювався шляхом вилуговування алюмінію, що забезпечило суттєве зростання питомої поверхні до 74,3 $м^2/г$. Введення нікелю до складу прекурсора сприяє формуванню більш дисперсної мікроструктури, що безпосередньо зумовлює зростання питомої поверхні та підвищує корозійну і термічну стабільність каталітичної системи. У процесах переробки смол або органічних викидів (бензол, фенол, нафталін) залізо часто провокує утворення коксу. Нікель сприяє газифікації вуглецевих відкладень, подовжуючи термін служби каталізатора. Встановлено, що введення кобальту (15% мас.) радикально підвищує каталітичну активність, забезпечуючи 95% конверсії вуглеводнів при температурі 350°С. Легування марганцем обумовлює формування наноструктурованої поверхні у вигляді гексагональних пластин та зірчастих кластерів, що суттєво збільшує площу доступної активної поверхні та інтенсифікує каталітичний процес. Встановлено, що легування міддю (3% мас.) та цирконієм (1% мас.) забезпечує стабілізацію мікроструктури та інгібує ріст кристалітів, що обумовлює підвищення механічної міцності та подовження терміну експлуатації каталізатора в агресивних газових середовищах. Експериментально підтверджено, що розроблений склад каталізатора Fe-Ni-Co-Mn-Cu-Zr (41%-33%-15%-12%-3%-1%) забезпечує високу ефективність знешкодження токсичних компонентів в умовах реального газового середовища коксохімічного виробництва. Дослідно-промислові випробування, проведені в реальних умовах смолоперегінного цеху, підтвердили високу ефективність розробки. При високих вхідних концентраціях забруднювачів (зокрема бензол – 40,38 $мг/м^3$, фенол – 15,38 $мг/м^3$, нафталін – 179,56 $мг/м^3$) ступінь знешкодження фенолу, бензолу та нафталіну склав 99,0-99,8%. Отримані результати відповідають нормативам гранично допустимих викидів, що дозволяє рекомендувати розроблений каталізатор для

© Belokon K.V., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

впровадження на підприємствах коксохімічної та металургійної галузей. *Ключові слова:* інтерметалідні каталізатори, залізо-алюмінієві сплави, теплове самозапалювання, вилуговування, питома поверхня, наноструктура, глибоке окиснення, вуглеводні, екологічна безпека, коксохімічне виробництво, газові викиди, фенол, бензол, нафталін.

Problem statement. The issue of environmental protection has remained a matter of paramount importance for all industrial enterprises over recent years. Coke-chemical production remains one of the most technologically burdened segments of the metallurgical cycle. Despite the strategic importance of coke as a reducing agent for blast furnace production, the industry is a source of emissions of more than 200 types of toxic compounds, including carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NO_x), benzene, phenols, and fine particulate matter [1]. For large industrial centers such as the city of Zaporizhzhia, the reduction of pollutant emissions at coke-chemical plants is exacerbated by the high density of enterprises and their proximity to residential areas. Under current technologies for coke production, as well as the recovery and processing of chemical coking products, the emission sources at coke-chemical plants vary significantly both in terms of emission volumes and the composition of chemical pollutants; consequently, each source requires specific technical solutions and substantial capital investment to improve the environmental situation. Existing gas cleaning systems often demonstrate insufficient efficiency, leading to the accumulation of toxicants in the surface layer of the atmosphere. The situation is further complicated by the necessity of post-war industrial recovery, which must align with the stringent standards of the European Green Deal.

Relevance of the study. Toxic organic substances generated during coke-chemical production represent a complex mixture with concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) significantly exceeding maximum permissible limits. Many of these compounds possess pronounced carcinogenic and mutagenic properties [2]. Stringent modern environmental requirements for industrial emissions necessitate the implementation of advanced detoxification technologies characterized by high energy efficiency and the utilization of unconventional and alternative energy sources [3]. Thermocatalytic treatment of gaseous emissions to remove toxic components is among the most effective methods, often achieving near-absolute purification levels [4].

Analysis of recent research and publications. The primary approaches for detoxifying emissions from coke-chemical production include electrostatic precipitation, thermal and thermocatalytic oxidation, as well as adsorption methods.

Electrostatic precipitation of tarry substances is considered the most common method for treating gases containing PAHs. The advantages of this method include its technical simplicity, relative cost-effectiveness, and ease of maintenance. However, the residual concentration of toxic organic substances in the purified gases discharged into the atmosphere remains significant, failing to meet current sanitary standards [5].

The high-temperature thermal method for PAHs detoxification is quite effective but entails significant energy consumption. Thermal incineration of contaminated gases may be viable for small exhaust gas volumes or when a plant possesses a high potential for waste heat recovery [1].

The adsorption method lacks sufficient efficiency; its application is primarily advisable when the spent adsorbent can be recycled or utilized within the plant's own production processes [6].

The method of thermocatalytic detoxification of toxic organic compounds is the most promising across all indicators due to its relatively low energy consumption. The development of modern high-efficiency catalysts, capable of achieving near-complete neutralization of organic substances at temperatures of 350-450°C (compared to thermal incineration, which occurs at temperatures around 1000°C), ensures high treatment efficiency at significantly lower costs. For this reason, the thermocatalytic oxidation method was selected for the treatment of toxic organic compounds in gaseous emissions from coke-chemical production [1].

However, traditional catalysts based on noble metals (Pt, Pd) are characterized by high costs and low resistance to poisoning by sulfur compounds, which are typical for coke oven gas [6]. At the same time, the use of more affordable oxide systems fails to provide the required conversion levels at low temperatures. There is a pressing scientific and practical need for the development of new, thermodynamically stable, and economically accessible materials – specifically intermetallic systems (based on Ni-Al, Fe-Al, Co-Al), that could ensure deep purification of coke-chemical emissions from carbon-containing components within the «green metallurgy» paradigm.

Scientific novelty. The challenge of environmental protection in coke-chemical production lies in the necessity of transitioning from traditional treatment methods to integrated, environmentally safe technologies. The current state of the industry demands the development of high-efficiency catalytic systems capable of stable operation within the corrosive environments of coke-chemical plants, while simultaneously ensuring minimal energy consumption and compliance with international environmental standards.

Scientific novelty. The scientific novelty of this work lies in the substantiation and development of catalytic gas purification systems for removing PAHs using intermetallic catalysts under the specific conditions of tar distillation production.

To achieve the stated objective, the following tasks were performed:

1) comprehensive analysis: based on analytical and experimental studies, the qualitative and quantitative

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

composition of pollutants generated during the technological processes of the tar distillation shop was determined.

2) development of new materials: intermetallic catalysts of the Fe-Ni-Co, Fe-Ni-Co-Mn, Fe-Ni-Co-Mn-Cu, and Fe-Ni-Co-Mn-Cu-Zr systems were synthesized; the elemental composition of the synthesized phases providing the highest catalytic activity was experimentally substantiated.

3) validation of efficiency: the physicochemical and catalytic properties of the obtained samples were investigated in the deep oxidation reactions of polycyclic aromatic hydrocarbons. It was established that the proposed catalyst with the composition Fe-Ni-Co-Mn-Cu-Zr (41%-33%-15%-12%-3%-1%) ensures a high degree of detoxification of toxic components under the specific conditions of coke-chemical production.

Presentation of the main material. Coking is a method of coal processing by heating at temperatures of 1000-1200°C without air access. During coking, the fuel decomposes, forming volatile substances (up to 25%) and a solid residue. The primary products of coke chemistry include coal coke (76-78%), coke oven gas (14-15%), and various chemical products (5-6%): dust, nitrogen oxides, sulfur dioxide, carbon monoxide, ammonia, phenol, benzene, benzopyrene, naphthalene, hydrogen sulfide, hydrogen cyanide, and graphite. Consequently, the concentrations of pollutants in the air of the working zones of coke-chemical plants exceed the maximum permissible concentrations (MPC) several times over. Coal dust concentrations reach 8 MPC and above, while harmful gases reach up to 3-4 MPC, with the exception of carbon monoxide, whose concentration in some cases exceeds the MPC severalfold.

The primary shops include coal preparation, coking, recovery of chemical coking products, coke oven gas desulfurization (hydrogen sulfide removal), tar distillation, crude benzene rectification, pitch coking, phthalic anhydride production, and fine chemicals shops.

Let us consider the tar distillation shop. This facility handles the processing of coal tar and the production of coal-based oils and electrode pitch. The shop consists of the following units: a tar storage facility; a tar distillation department; an electrode pitch production unit; a pitch storage yard; pitch granulation and road tar preparation units; an oil storage facility; a reagent storage and oil washing unit; emission control systems (a catalytic incineration unit); and a biochemical treatment plant.

The raw material for tar processing production is coal tar – a byproduct of coal coking. The primary stages of the coal tar processing cycle include: tar preparation for processing at the storage facility, where heating to temperatures of 70–80°C, preliminary dehydration, and homogenization of the coal tar are performed, along with the sedimentation of tar decanter sludges (foots); tar distillation; processing of fractions obtained through distillation; extraction of phenols from coal-based oils; final product manufacturing; and the production of coal-based electrode pitch in both liquid and granulated forms.

The tar storage facility is equipped with a warehouse (cargo shed) for heating and unloading coal tar arriving in railway tank cars from the recovery shop. Tar storage is managed within five above-ground vertical cylindrical tanks, each with a capacity of 2,000 tons. For raw material reception directly from the discharge bays, underground storage units with a volume of 150 m^3 each are provided. During the operation of the facilities, the following pollutants are emitted into the atmosphere (mg/m^3): hydrocyanic acid – 21, hydrogen sulfide – 40.30, benzene – 40.38, phenol – 15.38, and naphthalene – 179.56.

The transfer of coal tar from the storage facility to the distillation department is performed by a pumping station, the operation of which is accompanied by atmospheric emissions of the following pollutants (mg/m^3): benzene – 252, phenol – 185, and naphthalene – 840.

Inside the enclosed warehouse, in addition to unloading operations, the process of tank steaming is carried out, which is accompanied by atmospheric emissions of the following substances (mg/m^3): benzene – 128, hydrocyanic acid – 140, phenol – 235, and naphthalene – 341.

The storage tanks of the tar farm and the enclosed warehouse are equipped with a common collector system for transporting gaseous substances to the catalytic incineration unit. Prior to entering the catalytic reactor, the gas emissions are partially diluted with atmospheric air; subsequently, within the apparatus containing the catalyst, they undergo oxidation to carbon dioxide and water at temperatures of 400-450°C. The heating of the gas-air mixture within the unit is facilitated by tubular electric heating elements (TEHs). Before reaching the fan, the purified gases are cooled (diluted) with atmospheric air to a temperature of 75°C (Fig. 1). The annual operating time of the unit is 8,760 hours. The emissions of pollutants are discharged through a stack with a diameter of 0.4 m at a height of 30.0 m. The following substances are released into the atmosphere: nitrogen dioxide, sulfur dioxide, carbon monoxide, hydrocyanic acid, hydrogen sulfide, benzene, phenol, and naphthalene. Monitoring of the detoxification efficiency for organic substances was conducted by determining the concentrations of phenol, benzene, and naphthalene in samples of both contaminated and purified air.

To investigate the feasibility of using more cost-effective contacts within the emission control system (the catalytic incineration unit), polymetallic iron-based catalysts doped with transition metals (cobalt, nickel, manganese, copper, and zirconium) were developed. The selection of these additives was based on several considerations, including: the elimination of noble metals; high activity in deep oxidation processes typical for the coke-chemical industry; high mechanical strength and thermal stability, which are critical for catalysts operating in gas emission purification systems; and their wide-

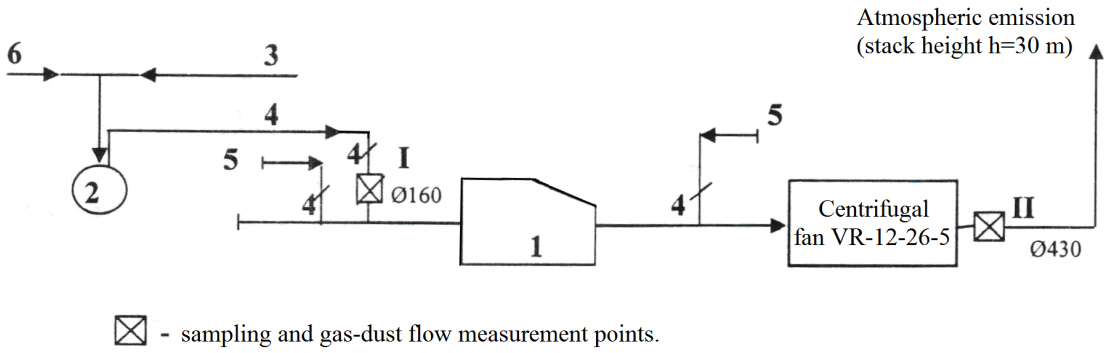


Fig. 1. Process flow diagram of the catalytic detoxification unit: 1 – catalytic reactor (apparatus); 2 – scrubber (washer); 3 – gas emissions from the warehouse (cargo shed); 4 – control valves (dampers); 5 – atmospheric air inlet (for dilution); 6 – gas emissions from the tar storage farm; I, II – sampling points and gas-dust flow parameter measurement locations.

spread industrial application alongside a robust manufacturing base for the mass production of polymetallic catalysts [7-9].

As the investigated catalyst for the oxidation of polycyclic aromatic hydrocarbons, an iron-based system with the stoichiometric composition $FeAl_3$ was used, synthesized via the thermal self-ignition method [10]. To enhance the catalytic activity, the $FeAl_3$ intermetallic was modified with varying amounts of transition metals.

Following synthesis, the material is a bilayer product consisting of oxide and metallic phases. The target metallic phase is separated from the oxide phase, after which it undergoes crushing and fractionation. A precursor fraction of 0.1-0.3 mm was utilized to obtain the catalyst. Both alkalis and acids can be used to dissolve the aluminum; however, in industrial practice for the production of Raney metals, NaOH and KOH solutions of various concentrations are most commonly employed.

Leaching of the samples was performed using a 20% NaOH solution. The amount of removed aluminum was monitored based on the sample weight loss. Hereafter, the catalyst composition will be characterized by numerical values representing the mass ratio of transition metals incorporated into the initial intermetallic charge. Losses across all synthesis stages do not exceed 5%.

X-ray diffraction (XRD) studies of the reaction products were carried out using a DRON-3 diffractometer. The content of active components was determined via atomic absorption spectroscopy. The surface area of the catalysts was measured using the BET method (thermal desorption of argon).

The activity of the synthesized catalysts was studied in hydrocarbon oxidation reactions using a flow-type unit with chromatographic analysis of the reaction products (Porapak Q).

The unit consists of a cylindrical flow reactor with a catalyst bed, a thermocouple for temperature control within the reactor, a chromatograph, a flow meter, and a cylinder containing a model gas mixture. The catalyst is heated primarily by the flow of the model gas mixture, which is preheated at the outer walls of the reactor. The reaction products were passed through a desiccant to remove water formed during the process. Experiments were conducted in the temperature range of 100 to 500°C, depending on the catalyst activity, with intervals of 25-100°C. The catalytic activity was characterized by the temperature of 100% hydrocarbon conversion ($T_{100\%}$).

The catalysts derived from iron-based intermetallic precursors exhibited a reasonably high catalytic activity. However, the oxidation process on these catalysts displays several characteristics distinct from those of other catalyst systems. These materials possess a higher specific surface area and, according to X-ray diffraction (XRD) data, consist primarily of oxides.

Let us examine the hydrocarbon oxidation process over the developed catalysts. The Fe (100%) sample initiates activity only at 200°C, reaching 80% hydrocarbon conversion at 500°C. The addition of nickel to the iron-based intermetallic catalyst significantly alters its physicochemical and operational characteristics. Instead of a pure iron phase, more complex structures are formed. This modification changes the electron density at the active sites, thereby enhancing catalytic activity in hydrocarbon oxidation reactions.

Nickel influences the temperature and velocity of the combustion front during alloy synthesis, allowing for precise control over the material's porosity. Furthermore, the nickel additive promotes the formation of a more highly dispersed structure, directly contributing to an increased specific surface area of the catalyst. While pure iron catalysts are prone to rapid irreversible oxidation and subsequent loss of activity, nickel enhances the corrosion and thermal stability of the system.

In the processing of tars or organic emissions (such as benzene, phenol, and naphthalene), iron frequently triggers coke formation. Nickel facilitates the gasification of carbon deposits, thereby extending the catalyst's service life. Consequently, nickel acts as

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

a potent modifier, transforming the iron catalyst into a high-performance material capable of operating under the rigorous conditions of metallurgical production.

The addition of nickel and cobalt to the catalyst composition results in a sharp increase in catalytic activity. With the addition of 5 wt.% cobalt, a 90% hydrocarbon conversion is achieved at 450°C. The sample containing 15 wt.% cobalt shows the best result, with 95% hydrocarbon conversion reached at 350°C.

Since the addition of manganese significantly enhances the activity of intermetallic catalysts, it was decided to incorporate it into the sample composition. All catalysts underwent pretreatment with hydrogen peroxide. In these samples, the cobalt content remained constant at 15 wt.%, while the manganese content varied from 5 to 15 wt.%.

These samples exhibit activity in hydrocarbon oxidation starting as low as 100°C, which is uncharacteristic of other intermetallic catalysts. On the optimal sample, containing 12 wt.% manganese, a 99% hydrocarbon conversion is achieved at 300°C.

Investigations into the catalytic activity of samples doped with Cu revealed significant differences compared to previously studied catalysts. The copper content was varied from 1 to 5 wt.%.

Iron-based samples exhibit activity in the hydrocarbon oxidation process at lower temperatures. For the majority of these samples, hydrocarbon conversion initiates as early as 100°C. However, this high initial activity negatively impacts the stability of these catalysts. The developed catalyst systems with various cobalt and manganese contents lose their activity in hydrocarbon oxidation reactions after only the tenth experiment, stabilizing at approximately one-third of their initial activity level.

Additional alloying of the catalysts with copper leads to the formation of strong bonds between the catalyst grains, which enhances the ultimate strength of the catalyst and extends its service life in gas purification systems. During the first twenty experiments, their activity in hydrocarbon oxidation remains unchanged; this is followed by a gradual, slow decline of 5-8%, after which the activity reaches a stable value.

The physicochemical properties of the precursors and their production method significantly influence the characteristics of the resulting catalysts. The synthesis conditions of the intermetallic are decisive not only for the microstructure of the precursor itself but also for the catalyst's microstructure, surface morphology and composition, and specific surface area, thereby exerting a major influence on the catalytic properties. The mechanical properties of the catalyst are directly dependent on the phase composition of the precursor. The addition of zirconium stabilizes the intermetallic structure, increasing the specific surface area of the catalyst. The zirconium content was varied from 1 to 3 wt.%.

The primary phase forming the precursor is Fe_4Al_{13}. All aluminide phases formed by iron contain a sufficient amount of aluminum for rapid and complete leaching. In combination with iron, cobalt forms aluminides with the composition Co_4Al_{13}, which also exhibit good leachability. As the Co content increases, the composition of the iron aluminide phases undergoes slight modification. The manganese-containing phase is difficult to identify on the X-ray diffraction pattern due to peak overlap.

Figure 2 shows an electron scanning microscopy image of the surface of the Fe-Ni-Co-Mn-Cu-Zr (41%-33%-15%-12%-3%-1%) catalyst. Regular hexagonal plates are preserved as the main structural element. The surface of the iron-based catalyst is covered with hematite Fe_3O_2 octahedra. The catalyst does not form a dense structure; however, hexagonal plates are present on the surface alongside hematite crystals.

Scanning electron microscopy (SEM) also enables point-to-point elemental analysis of the surface composition. A high concentration of manganese and oxygen was detected at all investigated structural points, suggesting that the plates are likely composed of manganese oxides. Cobalt, nickel, copper, and iron were also identified, which can be attributed to the composition of the substrate material upon which the structure forms.

A nanostructure consisting of hexagonal plates with a diameter of approximately 2 μm and a thickness of 100-200 nm forms on the surface of the manganese-containing sample. The plates are predominantly oriented perpendicular to the substrate surface on which they grow, frequently coalescing at the edges to form star-shaped clusters. Areas where the plates fuse along their faces to form extended columnar structures are also observed.

One of the reasons for the low catalytic activity of the precursors is their low specific surface area. During the preparation of catalysts through the leaching of aluminum, the specific surface area increases substantially. The addition of manganese to the iron-based precursor leads to the formation of a nanostructure on the catalyst surface, which enhances its specific surface area.

Despite its small percentage, the zirconium additive acts as a classic micro-dopant that inhibits crystallite growth, thereby helping to maintain the nanostructured state of the intermetallics. The specific surface area of the Fe-Ni-Co-Mn-Cu-Zr (41%-33%-15%-12%-3%-1%) catalyst was found to be 74.3 m^2/g.

Pilot-scale studies were conducted under actual conditions at a tar distillation shop using a laboratory-scale unit equipped with the developed catalyst, through which contaminated air was passed. The composition of the contaminated air at the reactor inlet (mg/m^3) was as follows: phenol – 5.4; benzene – 15.0; and naphthalene – 829.0. The tests demonstrated that the detoxification efficiency of organic compounds over the developed catalyst reached 99.0-99.8%, ensuring compliance with maximum permissible emission (MPE) standards for phenol, benzene, and naphthalene. Consequently, the catalyst is recommended for operation in coke-chemical production and similar technological processes.

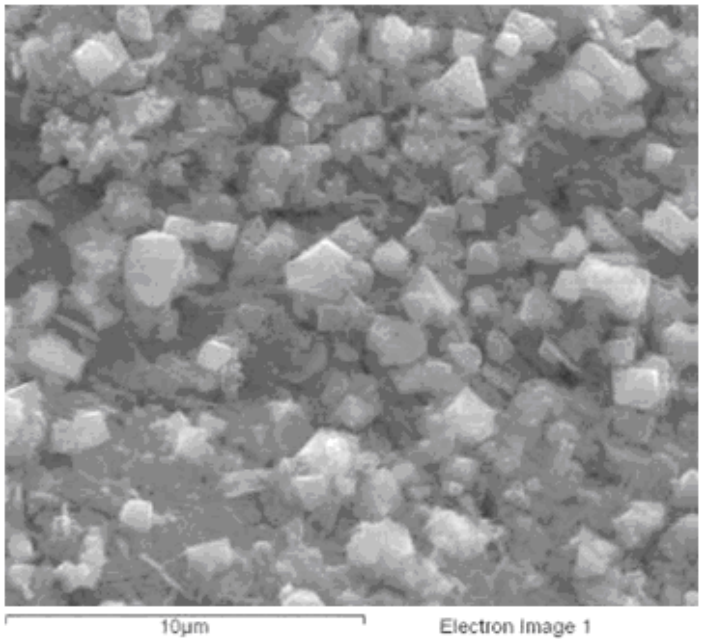


Fig. 2. Microphotograph of the surface of the Fe-Ni-Co-Mn-Cu-Zr (41%-33%-15%-12%-3%-1%) catalyst

Conclusions. Coke-chemical production is one of the most environmentally hazardous segments of the metallurgical cycle. This study identifies the composition of pollutants generated during the technological processes of a tar distillation shop, specifically: hydrocyanic acid, hydrogen sulfide, benzene, phenol, and naphthalene. To utilize more economically viable contacts in emission control systems (catalytic afterburning units), new polymetallic iron-based catalysts were developed. Intermetallic precursors of the stoichiometric composition $FeAl_3$ were synthesized using the thermal self-ignition method, which ensures the formation of a specific double-layer precursor structure where the predominant phase is Fe_4Al_{13}. To enhance catalytic activity, the precursors were modified with various amounts of transition metals, specifically by adding nickel (Ni), manganese (Mn), cobalt (Co), copper (Cu), and zirconium (Zr) in concentrations ranging from 1% to 35 wt. %. A technique for catalyst preparation was developed, which included a stage of additional sample stabilization with hydrogen peroxide. Treatment with H_2O_2 enables the removal of chemisorbed hydrogen from the precursor surface during leaching, facilitating the production of skeletal catalysts with a highly developed specific surface area, which reaches 74.3 m^2/g for the optimal composition. Nickel and cobalt significantly enhance catalytic activity by altering the electron density at the active sites. The addition of 15 wt. % cobalt allows for achieving 95% hydrocarbon conversion at a temperature as low as 350°C. Manganese promotes the formation of a unique surface nanostructure, which is critical for increasing the active surface area of the catalyst. Alloying with manganese enables a reduction in the 100% hydrocarbon conversion temperature by 100-150°C compared to unmodified analogues. Copper alloying ensures mechanical strength and activity stability, while zirconium acts as a micro-dopant that inhibits crystallite growth and preserves the nanostructured state of the system.

The developed systems exhibit activity starting from 100°C, which is atypical for standard intermetallic systems. It was established that the optimal catalyst composition, Fe-Ni-Co-Mn-Cu-Zr (41-33-15-12-3-1 wt. %, respectively), ensures a high degree of detoxification of toxic components under the conditions of coke-chemical production. Pilot-scale tests in a tar distillation shop confirmed the purification efficiency for phenol, benzene, and naphthalene at the level of 99.0-99.8%. The developed catalyst ensures full compliance with maximum permissible emission standards and is recommended for wide-scale implementation at coke-chemical and related industrial enterprises.

References

1. Ecological aspects of the neutralization of gas emissions leaving from the resin storehouse of Joint-stock company «Zaporozhkoks» / V. Rumiantsev, N. Yakubin, K. Belokon, E. Matukhno, C. Leventsova. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. No. 4. P. 105–109.
2. Cheng L., Wei W., Guo A., Zhang C., Sha K., Wang R., Wang K., Cheng S. Health risk assessment of hazardous VOCs and its associations with exposure duration and protection measures for coking industry workers. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 379. Article 134919. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134919.
3. Білець Д. Ю. Пошук нового способу утилізації коксохімічних відходів. Сучасні технології переробки пальних копалин : тези доп. 2-ї Міжнар. наук.-техн. конф. (Харків, 18-19 квіт. 2019 р.). Харків : НТУ «ХПІ», 2019. С. 18-19.

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

4. Catalytic Oxidation and Reduction of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Present as Mixtures in Hydrothermal Media / M. A. Nkansah, A. A. Christy, T. Barth. *Polycyclic Aromatic Compounds*. 2012. Vol. 32, no. 3. P. 408–422. DOI: http://dx.doi.org/10.1080/10406638.2012.663451.
5. Самойленко Н., Літовка А. Утилізація відходів коксохімічного виробництва. Scientific Collection «InterConf». 2022. No. 135. P. 312-313.
6. Черненко Я. М., Волошин М. Д., Ларичева Л. П. Каталізатори та сорбенти : навч. посібник. Кам'янське : ДДТУ, 2017. 317 с.
7. Intermetallic Nanocrystals: Syntheses and Catalytic Applications / Y. Yan, J. S. Du, K. D. Gilroy [et al.]. *Advanced Materials*. 2017. Vol. 29, iss. 14. Art. 1605997. DOI: https://doi.org/10.1002/adma.201605997.
8. Exploring Intermetallic Compounds: Properties and Applications in Catalysis / Z. Hou, M. Hua, Y. Liu [et al.]. *Catalysts*. 2024. Vol. 14, no. 8. Art. 538. DOI: https://doi.org/10.3390/catal14080538.
9. Intermetallic compounds in heterogeneous catalysis – a quickly developing field / M. Armbrüster, R. Schlögl, Y. Grin. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2014. Vol. 15, no. 3. Art. 034803. DOI: https://doi.org/10.1088/1468-6996/15/3/034803.
10. Жароміцний інтерметалідний сплав : пат. 107101 Україна : МПК C22C 1/05 (2006.01), C22C 19/03 (2006.01) / Бєлоконь Ю. О., Бєлоконь К. В. ; заявник Запорізька державна інженерна академія. № u 2015 10428 ; заявл. 26.10.2015 ; опубл. 25.05.2016, Бюл. № 10.

Дата першого надходження статті до видання: 30.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 581.9:502.7:622.3
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.24

ФЛОРА ТА РОСЛИННІСТЬ КАР'ЄРІВ: АНАЛІЗ І УЗАГАЛЬНЕННЯ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Пакуляк А.Ю., Григорчук І.Д.
Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка
вул. Огієнка, 61, 32300, м. Кам'янець-Подільський
andypower7723@gmail.co, hryhorchuk@kpnu.edu.ua

У статті здійснено ґрунтовний комплексний аналіз сучасних світових та вітчизняних наукових досліджень, присвячених вивченню особливостей формування флори та рослинності антропогенно трансформованих територій. У роботі обґрунтовано концепцію розгляду кар'єрів як унікальних модельних техногенних екосистем. Саме в їхніх межах розгортаються динамічні процеси первинної та вторинної сукцесії, що призводять до поступового формування специфічних кальцефільних рослинних угруповань. Такі локації часто стають вторинними осередками концентрації регіонального біорізноманіття та резерватами для рідкісних видів. Проаналізовано наукові публікацій останніх десятиліть, підготовлених провідними фахівцями з України, Чехії, Польщі, Німеччини, Великої Британії, Іспанії та Мексики. У цих працях детально висвітлено сукцесійну динаміку, флористичний склад, синтаксономічну структуру, вплив едафічних чинників на вектори формування рослинності, а також созологічне значення закинутих промислових об'єктів. Встановлено, що фізико-хімічні властивості вапнякових субстратів відіграють лімітуючу роль і визначають специфіку розвитку фітоценозів. Ключовими факторами виступають високий рівень pH, гострий дефіцит доступного фосфору, значна скелетність субстрату, специфічний водний режим та складний мікрорельєф кар'єрних виробок. Виявлено методологічну розбіжність у підходах: у міжнародній літературі домінує сукцесійний та ландшафтно-екологічний аналіз із акцентом на самовідновлення, тоді як вітчизняна наукова школа традиційно більше орієнтована на детальний еколого-флористичний та фітосозологічний (синтаксономічний) опис територій. Узагальнено фундаментальні закономірності формування рослинності на вапнякових техногенних субстратах у різних кліматичних зонах. Окреслено перспективні напрями подальших досліджень, зокрема в контексті розробки стратегій збереження біорізноманіття, оптимізації процесів рекультивації та використання потенціалу спонтанної сукцесії як ефективного інструменту відновлення порушених земель. *Ключові слова:* кар'єри, сукцесія, вапнякові субстрати, кальцефільна флора, техногенні екосистеми, синтаксономія, біорізноманіття, рекультивація.

Flora and vegetation of quarries: analysis and synthesis of scientific research. Pakulyak A., Hryhorchuk I.
The article provides a thorough and comprehensive analysis of contemporary global and domestic scientific studies devoted to investigating the peculiarities of flora and vegetation formation in anthropogenically transformed territories. The paper substantiates the concept of considering quarries as unique model technogenic ecosystems. Within their boundaries, dynamic processes of primary and secondary succession occur, leading to the gradual formation of specific calciphilous plant communities. Such locations often become secondary centers of regional biodiversity concentration and refugia for rare species. Scientific publications of recent decades prepared by leading specialists from Ukraine, the Czech Republic, Poland, Germany, the United Kingdom, Spain, and Mexico were analyzed. These works provide detailed coverage of successional dynamics, floristic composition, syntaxonomic structure, the influence of edaphic factors on vegetation formation vectors, as well as the sozological significance of abandoned industrial sites. It has been established that the physicochemical properties of limestone substrates play a limiting role and determine the specificity of phytocoenosis development. Key factors include a high pH level, an acute deficit of available phosphorus, a high skeletal content of the substrate, a specific water regime, and the complex microrelief of quarry excavations. A methodological divergence in approaches has identified: international literature is dominated by successional and landscape-ecological analysis with an emphasis on self-restoration, whereas the domestic scientific school traditionally focuses more on detailed ecological-floristic and phytosozological (syntaxonomic) descriptions of territories. The fundamental patterns of vegetation formation on limestone technogenic substrates in different climatic zones are summarized. Promising directions for further research are outlined, particularly in the context of developing biodiversity conservation strategies, optimizing reclamation processes, and utilizing the potential of spontaneous succession as an effective tool for restoring disturbed lands. *Key words:* quarries, succession, limestone substrates, calciphilous flora, technogenic ecosystems, syntaxonomy, biodiversity, reclamation.

Постановка проблеми. Інтенсивний розвиток гірничодобувної промисловості призводить до формування значних площ техногенно порушених земель, зокрема кар'єрів різного генезису. Видобуток вапняку, мергелю, базальту, піску чи інших корисних копалин призводить до повного руйнування ґрунтового покриву та первинної рослинності. Після припинення видобутку ці території стають осередками спонтанного формування рослинності, що відбувається за специфічних едафічних і мікрокліматичних умов. Особливе місце займають вапнякові кар'єри, де високий вміст карбонатів кальцію, лужна реакція середовища та низька буферність субстрату визначають специфіку формування кальцефільних угруповань.

Актуальність дослідження. Аналіз наукової літератури свідчить про те, що техногенно порушені

© Пакуляк А.Ю., Григорчук І.Д., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

ландшафти, зокрема ділянки після видобутку корисних копалин, стають об'єктом високої дослідницької уваги в останні кілька десятиліть. Це пояснюється не лише значним розширенням площ таких територій унаслідок інтенсивної гірничої діяльності, а й їх потенційною роллю як осередків біорізноманіття та моделей сукцесійних процесів [7, 8]. Вагомість досліджень флори та рослинності кар'єрів зумовлена потребою розроблення екологічно обґрунтованих підходів до відновлення техногенних екосистем та інтеграції цих територій у ширші екологічні мережі.

Техногенні ділянки функціонально відрізняються від природних екосистем через порушення первинної структури ґрунтів, зміну гідрогеохімічних умов та відсутність історичного насіннєвого банку. Саме ці зміни визначають особливості першої фази колонізації рослинністю, характерної для первинної сукцесії [7, 14]. Сукцесійні процеси в кар'єрах формуються під впливом поєднання едафічних (реакція субстрату, доступність поживних елементів) і ландшафтних (сусідні біотопи, мікрорельєф) факторів, що створює багатовимірний контекст для досліджень [9, 11].

Особливо актуальною є тема дослідження кар'єрів на карбонатних породах, де через підвищений pH та специфічну фізико-хімічну структуру субстрату формуються кальцефільні рослинні угруповання [6]. Такі угруповання не лише відрізняються видовою структурою від типової вторинної рослинності, а й можуть бути осередками рідкісних та ендемічних видів, що має безпосереднє значення для охорони біорізноманіття [12, 13]. Саме ці аспекти роблять кар'єри, в тому числі вапнякові, важливими об'єктами як фундаментальних екологічних досліджень, так і практичних заходів із збереження природно цінних біотопів.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження флори та рослинності кар'єрів інтегрується у вирішення низки важливих наукових і практичних завдань: поглиблення вивчення сукцесійних процесів, удосконалення підходів відновної екології, оптимізація рекультиваційних заходів, формування екологічних мереж та збереження регіонального біорізноманіття. Узагальнення світового та українського досвіду дозволяє сформувати підґрунтя для розроблення адаптивних моделей управління техногенними територіями з урахуванням природних особливостей субстрату, клімату та ландшафтного оточення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останні роки тематика вивчення флори та рослинності техногенних територій, включно з кар'єрами, отримала новий імпульс у науковій літературі. Сучасні дослідження все частіше розглядають кар'єрні екосистеми як важливі моделі сукцесій та питань консервації біорізноманіття. Так, первинні сукцесійні процеси та особливості ранніх стадій відновлення рослинності було досліджено на прикладі кар'єрів України та Європи [1, 2, 4, 5, 10].

У сучасних публікаціях кар'єри розглядаються як осередки збереження рідкісних видів та елементи екомережі Європи, з можливістю інтеграції їх у стратегії реалізації регламентів відновлення природи ЄС [3]. Підкреслюється їх роль у підтриманні екосистемних послуг – регуляції водного режиму, збереженні оселищ запилювачів та підвищенні ландшафтної стійкості. Так, у піщаних кар'єрах Німеччини, одним з аспектів вивчення був аналіз впливу антропогенних чинників на кількість рідкісних видів [10].

Також актуалізовано питання участі адвентивних та інвазійних видів у формуванні флори кар'єрів, де визначальними чинниками виступають мікрорельєф, трофність субстрату та близькість транспортних коридорів [2, 10].

Отже, сучасні дослідження демонструють комплексний підхід до аналізу кар'єрних екосистем, поєднуючи флористичний, синтаксономічний, функціональний та ландшафтно-екологічний напрями, що формує підґрунтя для подальших досліджень в Україні.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Попри значну кількість досліджень, на сьогоднішній день відмічається недостатня увага до довготривалого вивчення сукцесійних процесів: більшість досліджень охоплюють 5-15 років після припинення видобутку. Фрагментарними та локальними є дослідження у вапнякових кар'єрах, залишаються невизначеною оптимальна стратегія управління техногенними територіями, недостатня оцінка ролі цих територій у формуванні регіональної екологічної мережі України.

Новизна. У роботі системно зіставлено сучасні дослідження флори та рослинності кар'єрів; виділені специфіки розвитку рослинності саме на вапнякових субстратах; узагальнені дані щодо ролі кар'єрів як осередків біорізноманіття; окреслені наукові прогалини у дослідженнях техногенних екосистем України.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічна цінність дослідження визначається комплексним узагальненням і критичним осмисленням сучасних наукових підходів до аналізу флори та рослинності техногенних екотопів. Робота створює підґрунтя для поєднання положень сукцесійної теорії з практикою екологічної рекультивації порушених територій, обґрунтовує доцільність розгляду кар'єрів як моделей становлення первинних екосистем у специфічних едафічних умовах та формує теоретичну основу для розроблення рекомендацій з оптимізації структури природно-екологічної мережі.

Виклад основного матеріалу. У світовій науковій літературі останніх років дослідження флори та рослинності кар'єрів поступово виходять за межі класичного вивчення сукцесійних процесів і охо-

плюють ширшу низку екологічних, функціональних і політичних аспектів. Так, дослідження флори та рослинності кар'єрів у світовій літературі сформували окремий напрям відновної екології, в межах якого техногенні території розглядаються не лише як об'єкти рекультивації, а як моделі первинної сукцесії. Концептуальною основою більшості сучасних робіт є положення про те, що кар'єри після припинення видобутку корисних копалин функціонують як відкриті субстрати, подібні до природних первинних екотопів. Саме такий підхід розвинули К. Прах та П. Пишек [7], які довели, що спонтанна сукцесія у багатьох випадках забезпечує формування стійких рослинних угруповань без активного втручання людини. Автори показали, що за відсутності інтенсивної технічної рекультивації зберігається мозаїчність мікроекотопів, що є ключовою умовою для підвищення біорізноманіття.

У подальших дослідженнях [8] сукцесія в кар'єрах розглядалася як модельний процес, який дозволяє простежити закономірності колонізації, зміни життєвих форм і структури фітоценозів у часовому вимірі. Показано, що ранні стадії характеризуються домінуванням однорічних видів із високою насіннєвою продуктивністю, тоді як середні стадії включають багаторічні трави та чагарники, а в окремих випадках – деревні формації. Важливо, що швидкість переходу між стадіями суттєво залежить від хімічного складу субстрату та його фізичних властивостей [8].

Особливу увагу в міжнародній літературі приділено кар'єрам на карбонатних породах. Вапнякові та крейдяні субстрати характеризуються підвищеною лужністю, низьким вмістом доступного фосфору та високою дренованістю, що формує специфічні екологічні ніші для кальцефільних видів. Дослідження у Великобританії [11] продемонстрували, що на таких субстратах формуються угруповання, близькі до природних сухих луків за участю *Festuca ovina*, *Lotus corniculatus*, *Thymus* spp., *Helianthemum* spp. Автори підкреслюють, що відсутність родючого шару ґрунту на початкових етапах не є перешкодою для формування біологічно цінних угруповань, а навпаки – запобігає домінуванню конкурентних мезофітних видів [11].

Окрім дослідження сукцесійних процесів, сучасна наукова увага зосереджена на макрофункціональній ролі кар'єрів у збереженні біорізноманіття. Зокрема, у країнах ЄС значна частина вироблених кар'єрів інтегрована до мережі Natura 2000 як осередки рідкісних біотопів. Доведено, що в умовах антропогенно змінених ландшафтів такі об'єкти здатні виконувати функцію екологічних «островів», забезпечуючи стабільність популяцій степової та лучної флори і фауни.

У контексті сучасних природоохоронних ініціатив, зокрема Європейського регламенту відновлення природи (Nature Restoration Regulation), М. Бальєстерос з колегами обґрунтовують потенціал вироблених кар'єрів як ключових об'єктів для регенерації деградованих екосистем до 2030 року. Автори наголошують, що інтеграція таких біотопів у стратегії відновлення потребує ретельного наукового оцінювання локальних умов, запровадження довготривалого моніторингу та принципів адаптивного управління [3]. Доведено, що повністю відновлені чи частково рекультивовані кар'єри можуть забезпечувати регулювання водного режиму, створення місць проживання для запилювачів, сприяти регіональній екологічній стійкості та гідрологічній стабільності в ландшафті, що важливо для всієї сукупності ландшафтних функцій [3].

Актуальним напрямом міжнародних досліджень залишається аналіз динаміки видового багатства у зв'язку з комплексом абіотичних чинників. Зокрема, у роботі Дж. Мота з колегами [5], присвяченій гіпсовим кар'єрам Іберійського півострова, на основі аналізу багаторічних сукцесійних рядів показано, що спонтанна первинна сукцесія здатна до самовідновлення аутентичної природної рослинності. Це має критичне значення для відтворення оселищ, що мають пріоритетний статус для охорони в межах ЄС [5].

Ці висновки корелюють із даними [12, 13], які вказують на те, що традиційна технічна рекультивація, яка передбачає повне вирівнювання рельєфу та нанесення родючого шару ґрунту, суттєво знижує видове багатство порівняно зі спонтанною сукцесією. Це зумовлено втратою мікроструктурної різноманітності, яка формує широкий спектр мікрокліматичних ніш, необхідних для раритетних видів флори та фауни.

В Україні питання інтеграції техногенних територій до структури національної екомережі наразі перебуває на етапі науково-теоретичного обґрунтування та методологічної розробки. Вітчизняні дослідження мають дещо інший акцент. Зокрема, роботи І. Хом'яка зі співавторами [2] зосереджені на синтаксономічному аналізі рослинності кар'єрів Центрального Полісся. Авторами описано понад сотню асоціацій, що свідчить про високу структурну різноманітність техногенних угруповань. Встановлено, що рослинність формується переважно за рахунок лучно-степових і рудеральних видів, а ступінь участі інвазійних таксонів залежить від близькості до населених пунктів і транспортних шляхів. Показано, що темп та режим відновлення залежать від факторів середовища та механізмів поширення насіння на порушені субстрати [2].

Флористичні дослідження в межах Рівненської, Житомирської та Дніпропетровської областей засвідчують, що початкові стадії відновлення характеризуються домінуванням представників родин Asteraceae, Poaceae та Fabaceae. Подальше зростання видового багатства синхронізоване з акумуляцією органічної речовини та формуванням первинних

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

ґрунтів. Важливим є спостереження, що на вапнякових субстратах зберігаються відкриті ділянки, які підтримують популяції світлолюбних кальцефілів і запобігають гомогенізації ландшафту чагарниками. Як зазначають А. Бончковський та О. Безсмертна [1], якісні параметри фітоценозів безпосередньо визначаються морфологією рельєфу та літолого-стратиграфічними особливостями субстратів.

Ще одним напрямом дослідження є аналіз впливу кліматичних умов на перебіг сукцесій у кар'єрах. Так, порівняння результатів досліджень кар'єрів у різних кліматичних зонах Європи свідчить, що перебіг сукцесії значною мірою визначається співвідношенням температурного режиму та кількості опадів [4]. У межах атлантичної зони (Велика Британія, північ Франції, Бельгія) за умов помірно вологого клімату, відбувається відносно швидке зімкнення рослинного покриву. Уже на 10-15 рік після припинення видобутку формуються злаково-різнотравні угруповання з участю *Festuca ovina*, *Lotus corniculatus*, *Thymus* spp., що за структурою наближаються до напівприродних сухих луків. Висока атмосферна вологість сприяє інтенсивнішому ґрунтоутворенню та накопиченню гумусу. У дослідженнях [4], представлений аналіз ролі водного режиму у рекультивації вапнякового кар'єру в Чехії. Автори показали, що структура рослинних угруповань залежить від гідрофізичних властивостей субстрату, що важливо для планування ефективних заходів з відновлення. У Центральній Європі (Чехія, Польща, Німеччина) за умов помірно-континентального клімату сукцесія має більш виражений мозаїчний характер. Значну роль відіграє експозиція схилів кар'єру: південні та південно-західні схили зберігають відкриті ксеротермні ділянки протягом тривалого часу, тоді як на північних схилах швидше формуються чагарникові угруповання (*Cornus sanguinea*, *Prunus spinosa*). Саме контраст мікрокліматичних умов зумовлює високу біорізноманітність техногенних екотопів [4].

У південній Європі (Іспанія, Італія, Балкани) у межах середземноморської кліматичної зони провідним чинником стає дефіцит вологи. Тут сукцесія характеризується повільним зімкненням покриву, тривалим збереженням відкритих субстратів і домінуванням ксерофітних та напівчагарникових форм. Часто формуються угруповання з участю *Brachypodium retusum*, *Helianthemum* spp., *Satureja* spp. Обмежене ґрунтоутворення та ерозійні процеси зумовлюють стійке існування ранніх і середніх стадій сукцесії протягом десятиліть [5].

У північній Європі (Скандинавія) за умов прохолодного клімату сукцесія уповільнена через низькі температури та короткий вегетаційний період. Початкові стадії можуть зберігатися 20-30 років, при цьому важливу роль відіграють мохи та лишайники як піонерні організми. Формування деревної рослинності відбувається повільно і залежить від близькості джерел насіння [3].

Таким чином, у межах Європи простежується чітка кліматично зумовлена диференціація сукцесійних траєкторій: від відносно швидкої мезофітної стабілізації в атлантичній зоні до тривалого збереження ксеротермних стадій у середземноморському регіоні [11, 12]. Для України, яка розташована в межах помірно-континентальної зони, характерним є поєднання мезофітних та ксерофітних тенденцій, що особливо проявляється у вапнякових кар'єрах лісостепу.

Окремим аспектом сучасних досліджень є вивчення участі адвентивних та інвазійних видів у формуванні рослинності кар'єрів. Відкриті субстрати, відсутність сформованого ґрунтового профілю та низька конкуренція на ранніх стадіях створюють сприятливі умови для колонізації такими видами. У Центральній та Східній Європі найчастіше фіксуються *Robinia pseudoacacia*, *Solidago canadensis*, *Erigeron annuus*, *Acer negundo* [7, 8, 10]. Їх проникнення пов'язане з транспортними коридорами та близькістю урбанізованих територій. У карбонатних кар'єрах лісостепової зони України інвазійні види частіше приурочені до підніжжя відвалів і ділянок із накопиченням дрібнозему. Водночас на крутих схилах з мінімальним ґрунтовим шаром переважають аборигенні ксерофітні види, менш конкурентоздатні, але екологічно спеціалізовані [1]. Це свідчить про те, що мікрорельєф і трофність субстрату виступають ключовими регуляторами інвазійного процесу.

Таким чином, узагальнення сучасних досліджень демонструє, що кар'єри є складними екосистемами з високим потенціалом самовідновлення. Формування флори залежить від поєднання геохімічних умов, ландшафтного контексту та стратегії управління. Водночас в Україні відчувається потреба у довготривалих моніторингових дослідженнях кар'єрів із поєднанням флористичного, синтаксономічного та ландшафтно-екологічного аналізу.

Головні висновки. Аналіз сучасних наукових досліджень показав, що кар'єри є специфічними антропогенно трансформованими екосистемами, у межах яких формується флора, адаптована до екстремальних едафічних та мікрокліматичних умов. У структурі рослинності переважають піонерні, ксерофітні та кальцифільні види, здатні колонізувати бідні субстрати.

Сукцесійні процеси в кар'єрах мають регіональні відмінності та визначаються кліматом, властивостями субстрату, віком об'єкта та характером управління.

Інвазійні види істотно впливають на структуру та динаміку рослинності, особливо на ранніх стадіях сукцесії, змінюючи конкурентні взаємодії та потенційно знижуючи природоохоронну цінність територій.

Встановлено методологічну нерівномірність досліджень: переважають роботи, присвячені рослинності покинутих або рекультивованих кар'єрів, тоді як

комплексні та довготривалі дослідження залишаються обмеженими. Кар'єри можуть виконувати роль додаткових оселищ для окремих видів, однак не є повноцінною заміною природних кальцифільних екосистем.

Перспективи використання результатів дослідження. Узагальнені положення можуть бути використані при розробленні програм екологічної рекультивації, плануванні моніторингу рослинності та оцінюванні природоохоронної цінності кар'єрів. Практичне значення мають рекомендації щодо контролю інвазійних видів, врахування регіональних сукцесійних особливостей та застосування функціонально-екологічного підходу до аналізу флори.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на довгостроковий моніторинг сукцесії, вивчення ґрунтотворних процесів і біотичних взаємодій, а також інтеграцію польових досліджень із просторовим аналізом. Це сприятиме формуванню науково обґрунтованих стратегій управління кар'єрними територіями в контексті збереження біорізноманіття.

Література

1. Бончковський А., Безсмертна О. Особливості рослинної сукцесії у кар'єрі цегельного заводу в с. Новий Тік (Рівненська обл.). *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Біологія*. 2020. Т. 80, № 1. С. 44–49.
2. Хом'як І. В. Синтаксономія відновлюваної рослинності кар'єрів Центрального Полісся. *Український ботанічний журнал*. 2022. Т. 79, № 3. С. 142–153.
3. Ballesteros M., Rehounková K., Decleer K. et al. Maximising biodiversity potential in Europe's mines and quarries: A key role for EU Nature Restoration Regulation targets. *Ambio*. 2026. Vol. 55. P. 280–296. DOI: https://doi.org/10.1007/s13280-025-02235-4.
4. Burnog M., Kucera A. The role of the water regime in a reclaimed limestone quarry. *Journal of Forest Science*. 2024. Vol. 70, no. 8. P. 391–406.
5. Mota J. F., Martínez-Hernández F., Salmerón-Sánchez E. et al. Spontaneous Primary Succession and Vascular Plant Recovery in the Iberian Gypsum Quarries: Insights for Ecological Restoration in an EU Priority Habitat. *Plants*. 2023. Vol. 12, no. 5. Art. 1162. DOI: doi.org.
6. Novák J., Konvicka M. Proximity of limestone quarries and biodiversity: patterns of species richness in the Czech Republic. *Biological Conservation*. 2006. Vol. 129. P. 108–117.
7. Prach K., Pysek P. Using spontaneous succession for restoration of human-disturbed habitats: experience from Central Europe. *Ecological Engineering*. 2001. Vol. 17. P. 55–62.
8. Prach K., Pysek P., Walker L. R. Restoration of temperate deciduous forests on former agricultural land: a review of concepts and practice. *Restoration Ecology*. 2011. Vol. 19. P. 1–7.
9. Rehounková K., Prach K. Spontaneous vegetation succession in gravel-sand pits: role of site conditions, management, and landscape context. *Restoration Ecology*. 2008. Vol. 16. P. 134–141.
10. Streitberger M., Fartmann T., Kettermann M. et al. Disturbance fosters vascular plant and bee species richness in sand quarries. *Journal of Environmental Management*. 2025. Vol. 392. Art. 126628. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126628.
11. Tischew S., Kirmer A., Becker U. et al. Biodiversity and conservation value of spontaneous vegetation succession on disturbed sites. *Applied Vegetation Science*. 2010. Vol. 13. P. 89–97.
12. Tropek R., Kadlec T., Konvicka M. et al. Spontaneous succession in limestone quarries: pattern of vegetation changes. *Journal of Applied Ecology*. 2010. Vol. 47. P. 139–147.
13. Tropek R., Purer J., Konvicka M. Abandoned quarries as refugia for native and endangered species in agricultural landscapes. *Conservation Biology*. 2012. Vol. 26. P. 837–845.
14. Walker L. R., del Moral R. Primary succession and ecosystem rehabilitation. Cambridge : Cambridge University Press, 2003. 442 p.

Дата першого надходження статті до видання: 02.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 504.064.36
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.25

ГЕОМОРФОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ОЦІНКИ ПРИДАТНОСТІ ТЕРИТОРІЙ ДО ЗАБУДОВИ

Зеленчук І.Д., Сонько С.П.
Уманський національний університет
вул. Інститутська, 1, 20300, м. Умань
zelenchuk.id@gmail.com

У статті представлено метод інтегрального оцінювання придатності територій до забудови з урахуванням антропогенної трансформації рельєфу, що виникає в результаті будівельної діяльності. Починаючи з початкових етапів, а саме з виконання планувальних земляних робіт та улаштування котлованів, будівництво супроводжується зміною морфометричних характеристик рельєфу, перемішуванням ґрунтів, формуванням антропогенних форм, що зумовлює зміну умов водного режиму, морфоскульптури рельєфу та перебігу екзогенних геоморфологічних процесів [1].

Вплив змін морфометричних параметрів рельєфу та механіко-пружних і геохімічних властивостей ґрунтів, що виникають у процесі інженерної підготовки територій, на результати оцінювання умов їх освоєння розглянуто з позицій просторової неоднорідності. Показано, що застосування морфометричних характеристик рельєфу, визначених для його вихідного стану, без урахування змін, які виникають у процесі будівельної діяльності, обмежує достовірність оцінювання придатності територій до забудови.

Кількісну оцінку ступеня антропогенної трансформації рельєфу виконано за коефіцієнтом, що визначається як відношення площі трансформованих ділянок до загальної площі території. Його застосування забезпечує класифікацію територій за рівнем порушення морфологічної структури рельєфу та уніфікацію оцінювання антропогенного впливу.

Оцінювання придатності територій до забудови здійснюється на основі поєднання морфометричних характеристик рельєфу, інженерно-геологічних умов і показників антропогенної трансформації із застосуванням математичного розрахунку. Узагальнений показник враховує кут нахилу схилів, вертикальну та горизонтальну розчленованість рельєфу, експозицію та ступінь трансформованості території.

За результатами визначення інтегрального показника території поділяються на сприятливі, умовно сприятливі та несприятливі, що забезпечує врахування морфометричних параметрів рельєфу при обґрунтуванні напрямів їх використання. Отримані результати підтверджують доцільність використання інтегрального підходу при оцінюванні придатності територій до забудови з урахуванням змін морфометричних характеристик рельєфу. Запропонований метод забезпечує можливість кількісної інтерпретації ступеня антропогенного впливу на рельєф та дозволяє підвищити об'єктивність прийняття інженерно-планувальних рішень. *Ключові слова:* рельєф, антропогенна трансформація, інтегральний показник, інженерно-геоморфологічні умови, ландшафти.

Geomorphological principles of land suitability assessment for construction. Zelenchuk I., Sonko S.

The paper presents a method of integrated assessment of land suitability for construction, taking into account the anthropogenic transformation of relief resulting from construction activities. Starting from the initial stages, namely earthworks and excavation works, construction is accompanied by changes in morphometric characteristics of the relief, soil mixing, and the formation of anthropogenic landforms, which leads to changes in hydrological conditions, relief morphosculpture, and the course of exogenous geomorphological processes.

The impact of changes in morphometric parameters of the relief and mechanical-elastic and geochemical properties of soils occurring during site preparation on the assessment of development conditions is considered from the perspective of spatial heterogeneity. It is shown that the use of morphometric characteristics defined for the initial state of the relief, without considering changes caused by construction activities, reduces the reliability of land suitability assessment.

The degree of anthropogenic transformation of the relief is quantitatively evaluated using a coefficient defined as the ratio of the area of transformed land to the total area. Its application ensures classification of territories according to the level of disturbance of the morphological structure of the relief and provides a unified assessment of anthropogenic impact [1].

The assessment of land suitability for construction is carried out based on a combination of morphometric characteristics of the relief, engineering-geological conditions, and indicators of anthropogenic transformation using mathematical calculations. The integrated indicator takes into account slope angle, vertical and horizontal dissection of the relief, aspect, and the degree of transformation of the territory.

Based on the values of the integrated indicator, territories are classified as suitable, conditionally suitable, and unsuitable, which ensures consideration of morphometric parameters in substantiating land use decisions.

© Зеленчук І.Д., Сонько С.П., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

The obtained results confirm the feasibility of using an integrated approach for assessing land suitability for construction, taking into account changes in morphometric characteristics of the relief. The proposed method enables quantitative interpretation of the degree of anthropogenic impact on the relief and improves the objectivity of engineering and planning decision-making. *Key words:* relief, anthropogenic transformation, integrated index, engineering-geomorphological conditions, landscapes.

Постановка проблеми. Сучасне господарське використання територій, зокрема їх підготовка до забудови та здійснення будівельних робіт, супроводжується інтенсивним антропогенним впливом на морфологічну організацію рельєфу [1]. Рельєф є головною властивістю ландшафту і визначає просторову структуру території, умови формування поверхневого стоку та розвиток екзогенних геоморфологічних процесів, що зумовлює його значення для оцінювання придатності територій до забудови [2, 3].

Існуючі підходи до оцінювання придатності територій до забудови переважно ґрунтуються на врахуванні інженерно-геологічних і планувальних характеристик, тоді як геоморфологічні особливості рельєфу часто враховуються фрагментарно або узагальнено. Зокрема, у багатьох випадках оцінювання обмежується аналізом окремих морфометричних показників без урахування просторової організації форм рельєфу та характеру перебігу екзогенних процесів. Такий підхід не забезпечує повного уявлення про умови функціонування територій і може призводити до невідповідності між природними характеристиками рельєфу та прийнятими містобудівними рішеннями [4].

Додатковою проблемою є недостатнє врахування змін рельєфу, що виникають у процесі інженерної підготовки територій. Унаслідок виконання планувальних земляних робіт відбувається порушення природних співвідношень між формами рельєфу, змінюються умови формування поверхневого стоку та активізуються окремі екзогенні геоморфологічні процеси. При цьому оцінювання придатності територій часто здійснюється без урахування цих змін або з їх формальним врахуванням [3, 4].

Для України це питання набуває підвищеної актуальності у зв'язку з просторовою неоднорідністю рельєфу та його антропогенною трансформацією, що ускладнює оцінювання придатності рельєфу до забудови.

Наукова новизна роботи полягає у врахуванні антропогенної трансформації рельєфу, зумовленої інженерною підготовкою територій, як чинника, що змінює умови формування поверхневого стоку та перебіг екзогенних геоморфологічних процесів і, відповідно, впливає на результати оцінювання придатності територій до забудови.

Актуальність дослідження. Актуальність дослідження визначається необхідністю врахування змін морфометричних характеристик рельєфу, що виникають на початкових етапах будівництва, зокрема під час інженерної підготовки територій, при оцінюванні його придатності до забудови. Геоморфологічні дослідження свідчать, що виконання планувальних земляних робіт супроводжується перерозподілом гірських порід і формуванням антропогенних форм рельєфу [5]. У прикладних підходах до оцінювання придатності територій до забудови використовуються характеристики рельєфу, визначені для його вихідного стану, без урахування змін, що виникають у процесі інженерної підготовки територій [6]. Невідповідність між динамічним характером рельєфу та статичним підходом до його оцінювання обмежує достовірність результатів визначення придатності територій до забудови. Це зумовлює необхідність врахування змін морфологічних характеристик рельєфу при розробленні підходів до оцінювання його придатності до забудови. Таким чином, існує необхідність удосконалення підходів до оцінювання придатності територій до забудови з урахуванням морфологічної організації рельєфу, умов формування поверхневого стоку та характеру перебігу екзогенних геоморфологічних процесів, а також змін, що відбуваються внаслідок будівельної діяльності.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Авторський доробок спрямований на розвиток методичного забезпечення оцінювання придатності рельєфу до забудови з урахуванням його трансформацій, зумовлених інженерно-планувальними та будівельними роботами. Дослідження орієнтоване на вирішення актуальних наукових завдань у галузі інженерної екології та ландшафтознавства, що пов'язані з кількісною оцінкою змін морфометричних параметрів рельєфу та врахуванням цих змін при оцінюванні інженерно-географічних умов освоєння територій.

Отримані результати можуть бути використані при вдосконаленні процедур інженерно-геоморфологічного районування територій, зокрема у частині диференціації ділянок за складністю умов забудови з урахуванням змін параметрів рельєфу, що виникають унаслідок будівелної діяльності.

Практичне спрямування роботи полягає у застосуванні результатів дослідження при підготовці містобудівної та проєктної документації, де необхідне обґрунтування рішень щодо розміщення об'єктів будівництва з урахуванням характеристики рельєфу. Використання запропонованих положень дозволяє підвищити узгодженість між властивостями та компонентами ландшафту, що приймаються при оцінюванні, та фактичним станом територій після виконання інженерних робіт.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження геоморфологічних засад оцінки придатності територій до забудови базуються на роз-

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

витку кількісних методів аналізу рельєфу, інтеграції геоінформаційних технологій та врахуванні антропогенних трансформацій [7].

Фундаментальні підходи до аналізу рельєфу як системи сформульовано ще у праці британського геоморфолога Richard J. Chorley [8], де обґрунтовано необхідність кількісного опису, аналізу, форм рельєфу. Подальший розвиток цієї концепції представлено у дослідженнях американського геоморфолога, професора Колорадського державного університету (США) Stanley A. Schumm, який у своїй праці [9] довів зв'язок морфометричних параметрів із динамікою геоморфологічних процесів.

Базові принципи оцінки земель сформульовано у рамках звіту ООН Land evaluation від 1976 р., де визначено, що придатність територій встановлюється через зіставлення їх природних властивостей із вимогами конкретного виду використання. У подальших подібних звітах ООН, а саме 1993р., уточнено підходи до land evaluation, зокрема необхідність урахування рельєфу як одного з ключових факторів.

Значну увагу у сучасних дослідженнях приділено впливу антропогенних чинників на рельєф. У роботі [10] британського географа A. Goudie доведено, що господарська діяльність є одним із провідних факторів трансформації рельєфу. А також показано зв'язок між змінами землекористування та активізацією ерозійних процесів.

Методологічні засади екологічного планування територій в 1969 р. заклав шотландський географ I. McHarg, який запропонував метод накладання тематичних карт для визначення оптимального використання територій [11]. Подальший розвиток цього методу відображено у прикладних дослідженнях оцінки придатності територій широко застосовуються GIS та методи багатокритеріального аналізу. У роботах [12] доведено ефективність інтеграції природних і соціально-економічних факторів у GIS та розроблено GIS-MCDA model.

В українській науковій школі важливе фундаментальне значення мають праці доктора географічних наук, професора П. Шищенка [13;14], у яких обґрунтовано ландшафтний підхід до оцінки територій, та методи ландшафтного аналізу.

Важливим для нас є праці українського географа-ландшафтознавця М. Гродзинського [15], який розвинув концепцію стійкості ландшафтів, що є ключовою при визначенні допустимих навантажень на територію. Теоретичним підгрунтям слугували праці українського геоморфолога О. Маринича, який у своїй роботі [16] систематизував фізико-географічні умови України, що визначають можливості її господарського освоєння.

Вагомою методологічною базою нашого дослідження слугувала праця кандидата географічних наук, наукового співробітника Інститут географії НАН України І. А. Байдікова [7], який запропонував варіант методики оцінювання придатності рельєфу для господарського використання території у процесі її просторового планування.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.

У нашій статті продовжується пошук можливих варіантів розв'язання задачі оцінювання придатності територій до забудови на основі морфографічних та морфометричних характеристик рельєфу. Незважаючи на значну кількість досліджень у галузі геоморфології, інженерної географії та просторового планування, питання комплексної оцінки рельєфу як базової властивості ландшафту залишається недостатньо розробленим. Зокрема, існуючі підходи не забезпечують уніфікованості методичного апарату, що ускладнює їх застосування для різних видів господарського освоєння територій, зокрема для будівництва [3].

Попередні дослідження автора та його наукового керівника дали змогу окреслити головні підходи до оцінювання рельєфу території, шляхом визначення його морфометричних параметрів, ступеня розчленованості, крутизни та експозиції схилів, а також характеру геоморфологічних процесів. Встановлено, що ці показники мають ключове значення при обґрунтуванні придатності територій до забудови, проте їх використання в існуючих методиках має фрагментарний характер і не вповній мірі враховує закономірності взаємодії між біотичними та абіотичними компонентами територіальних комплексів.

Аналіз сучасних досліджень засвідчує відсутність комплексного підходу до оцінювання придатності територій до забудови. Крім того наявні методики сформовані в межах окремих прикладних напрямів, зокрема, інженерно-геологічного, екологічного та містобудівного, кожен з яких враховує лише частину властивостей території. При цьому геоморфологічні характеристики рельєфу у більшості досліджень використовуються як окремі параметри оцінювання, без їх системної інтеграції в оцінку інженерно-геоморфологічних умов території, що знижує об'єктивність оцінки її придатності до забудови Крім того, нормативні документи (ДБН) містять лише узагальнені рекомендації щодо врахування параметрів рельєфу, що обмежує можливість формування єдиної універсальної методики оцінювання [17].

У межах виконання цього дослідження уточнено підходи до комплексного оцінювання рельєфу території з урахуванням його морфометричних характеристик, інженерно-геологічних умов та прояву геоморфологічних процесів. Особливу увагу приділено необхідності інтеграції в розрахункову математичну модель кількісних показників рельєфу (ухили, розчленованість, стійкість схилів) із якісними характеристиками, що відображають динаміку процесів та їх вплив на господарське освоєння територій [18].

Інтеграція геоморфологічного та ландшафтного підходів дозволяє розглядати рельєф не лише як сукупність морфометричних показників, а як основу ідентифікування просторових відмінностей природних умов території та їх стійкості до антропогенних навантажень. При цьому сучасні методи геоінформаційного аналізу та використання цифрових моделей рельєфу забезпечують можливість кількісного опису його параметрів, однак їх застосування у задачах оцінювання придатності територій до забудови залишається недостатньо систематизованим [19].

Підсумовуючи, зауважимо, що основною невирішеною проблемою залишається відсутність універсальної, науково обґрунтованої методики оцінювання придатності рельєфу територій до забудови, яка б враховувала як природні, так і антропогенні чинники його трансформації. Це зумовлює необхідність продовження робити над розробленням узагальненої методики оцінювання придатності територій до забудови на основі геоморфологічних характеристик рельєфу.

Саме на розв'язання цієї наукової проблеми й спрямовано наше дослідження.

Новизна. Наукова новизна дослідження полягає у розробленні інтегрального підходу до оцінювання придатності територій до забудови, що базується на кількісній оцінці морфометричних характеристик рельєфу, інженерно-геологічних умов та показників активності геоморфологічних процесів.

Обґрунтовано доцільність застосування поетапного методичного підходу до оцінювання рельєфу територій планованої будівельної діяльності, який передбачає послідовне виконання: збору і систематизації вихідних даних – картографічних, дистанційних, топографо-геодезичних, аналізу природних і антропогенних чинників трансформації рельєфу, оцінювання стійкості території та функціонального зонування за складністю інженерно-геологічних умов.

Подальшого розвитку набули методичні положення оцінювання придатності територій до забудови шляхом впровадження бальної системи оцінки рельєфу та рівня трансформації ландшафту, що забезпечує уніфіковану кількісну інтерпретацію ступеня антропогенного впливу на інертні та природні компоненти територіальних комплексів.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічне значення дослідження полягає у формуванні алгоритму дослідження придатності територій до забудови, що передбачає впорядковану послідовність аналізу рельєфу, інженерно-геологічних умов та сучасних геоморфологічних процесів. Методично обґрунтовано застосування шкалювання показників, що дозволяє здійснювати порівняльну оцінку територій та їх диференціацію за умовами забудови.

Загальнонаукове значення роботи полягає у встановленні залежностей між морфометричними параметрами рельєфу та стійкістю території до техногенного навантаження. Отримані результати розширюють уявлення про роль рельєфу у формуванні просторових відмінностей умов освоєння територій та дозволяють кількісно інтерпретувати вплив геоморфологічних характеристик на можливість застосування сучасних будівельних технологій та методів.

Виклад основного матеріалу. Будівельна діяльність спричиняє зміну морфометричних характеристик рельєфу та інженерно-геологічних властивостей ґрунтів унаслідок механічного впливу, перерозподілу навантажень і трансформації умов водного режиму. Формування насипів і виїмок, планування поверхні та дія динамічних навантажень призводять до зміни напружено-деформованого стану ґрунтового масиву та порушення природної рівноваги ландшафтів.

Оцінювання рельєфу території, відведення якої заплановано під будівельну діяльність, здійснюється з метою встановлення морфологічної структури поверхні, її оцінювання, ідентифікації сучасних геоморфологічних процесів та визначення інженерно-геологічних обмежень, що зумовлюють стійкість і функціональну придатність території до забудови.

У процесі будівництва відбувається зміна фізичних характеристик ґрунтів, а саме – збільшення об'ємної щільності.та відповідне зменшення пористості внаслідок ущільнення, що знижує їх водоутримувальну здатність і змінює умови інфільтрації. Коефіцієнт фільтрації зазвичай зменшується при ущільненні, але у зонах порушення структури ґрунту (тріщини, насипні шари) можливе його локальне збільшення, що зумовлює просторову неоднорідність фільтраційних властивостей і, як наслідок, сприяє розвитку водної ерозії.

Кількісна оцінка ступеня антропогенної трансформації рельєфу (АТР) виконується за допомогою коефіцієнта K_{ATR} розраховується як:

$$K_{\text{ATR}} = \frac{S_a}{S}, . \quad (1)$$

де: S_a площа антропогенно трансформованих ділянок; S загальна площа відведеної території. Значення K_{ATR} арактеризує рівень порушення морфологічної структури рельєфу та використовується для класифікації територій за ступенем їх можливої антропогенної трансформованості.

Оцінювання придатності територій реалізується через інтегральний показник показник придатності території до забудови (I):

$$I = w_1 f(\alpha) + w_2 f(D_v) + w_3 f(D_h) + w_4 f(E) + w_5 f(K_{\text{ATR}}), . \quad (2)$$

де: w_i вагові коефіцієнти параметрів (безрозмірні величини $\sum w_i=1$); f) – функції нормування параметрів; a – кут нахилу схилів, градуси; D_v – вертикальна розчленованість рельєфу, м; D_h – горизонтальна розчленованість рельєфу, км/км²; E – експозиція схилів. Показник I відображає сукупний вплив морфометричних характеристик рельєфу на умови забудови та використовується для класифікації територій.

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

На основі значень інтегрального показника виділяються три категорії територій:

– *сприятливі* – низькі значення a та D, відсутність активних геоморфологічних процесів;

– *умовно сприятливі* – середні значення параметрів, наявні локальні обмеження;

– *несприятливі* – високі значення a, значна розчленованість, активні геоморфологічні процеси.

Методичний підхід ґрунтується на інтегрованому використанні матеріалів містобудівної документації, зокрема детальних планів територій (ДПТ), картографічних і дистанційних даних, результатів топографо-геодезичних знімань та інженерно-геологічних вишукувань, що забезпечує комплексність аналізу природних умов.

Запропонований поетапний підхід передбачає послідовне виконання аналітичних процедур, що включають формування інформаційної бази про рельєф досліджуваної ділянки, встановлення природних і техногенних чинників його формування та трансформації, оцінювання екологічної стійкості поверхні території і її компонентів, а також просторову диференціацію території за складністю інженерно-геологічних умов [3]. На цьому етапі визначаються морфометричні параметри рельєфу, що виступають кількісною основою подальшого аналізу.

Заключним етапом є виконання інтегральної, бальної оцінки придатності рельєфу, отриманих показників з урахуванням морфометричних характеристик та ступеня можливої антропогенної трансформованості території. На основі отриманих значень здійснюється обґрунтування доцільних напрямів використання території та визначення видів будівельної діяльності, що відповідають встановленим інженерно-геоморфологічним умовам. Послідовність етапів аналізу, склад показників та застосовані методи наведено в таблиці 1.

Указана в таблиці 1 методика побудована за принципом поетапної деталізації, де результати кожного етапу використовуються як основа для наступного. Це дозволяє забезпечити узгодженість оцінок і врахувати взаємозв'язки між характеристиками рельєфу, умовами їх формування та сучасними процесами, що впливають на стійкість території.

Узагальнення результатів оцінювання забезпечує можливість обґрунтованого визначення функ-

Таблиця 1

Етапи та методи оцінювання рельєфу території планованої будівельної діяльності (етап 1 та 2)

Етап дослідження	Напрям аналізу	Зміст і методи виконання
Етап 1 Збір вихідних даних про рельєф	Аналіз планів детального планування території (ДПТ) та картографічних матеріалів	Карти детального планування територій; карти ухилу поверхні; карти ерозійного розчленування рельєфу; карти четвертинних відкладів.
	Аналіз матеріалів дистанційного зондування землі (ДЗЗ)	Дані аерофототопографічного та космічного знімання; результати зйомки за допомогою БПЛА [2]
	Аналіз топографо-геодезичних даних та матеріалів інженерних вишукувань	Результати топографічного знімання території планованого розміщення будівельного майданчика
Етап 2 Виявлення геоморфологічних процесів та чинників	Аналіз природних чинників	Оцінювання природних геоморфологічних умов
	Аналіз антропогенних чинників	Оцінювання змін рельєфу під впливом господарської діяльності
	Комплексна оцінка впливу природних і антропогенних чинників	Визначення рівня порушення рельєфу; виділення ділянок за ступенем трансформованості
Етап 3 Інженерно-геологічна характеристика території	Аналіз інженерно-геологічних даних з метою оцінювання стійкості території та схилів	Визначення ступеня загальної стійкості території в умовах виконання робіт з планування земельної ділянки та під'їзних доріг
	Функціональне зонування	Поділ території дослідження на ділянки за складністю інженерно-геологічних умов для будівництва (прості, середні, складні) з урахуванням даних інженерно-геологічних профілів
Етап 4 Оцінка придатності рельєфу	Бальна оцінка рельєфу (за перепадом висот)	Оцінка рельєфу за критерієм придатності: придатний (4 бали), умовно придатний (3 бали), умовно непридатний (2 бали), непридатний (1 бал) [3]
	Напрями використання	Будівництво виробничих і логістичних комплексів; промислове та високотехнологічне будівництво; житлове будівництво [20]

ціонального використання території з урахуванням встановлених інженерно-геоморфологічних обмежень [21].

Головні висновки. У дослідженні встановлено, що існуючі підходи до оцінювання придатності територій до забудови не забезпечують комплексного врахування організації рельєфу та перебігу екзогенних геоморфологічних процесів, оскільки базуються на аналізі окремих компонентів без їх системної інтеграції; водночас виконання інженерної підготовки територій супроводжується зміною морфометричних характеристик рельєфу та інженерно-геологічних властивостей ґрунтів, що порушує рівновагу геосистем і зумовлює зміну інтенсивності геоморфологічних процесів.

Обґрунтовано необхідність урахування антропогенної трансформації рельєфу як ключового чинника оцінювання придатності територій до забудови, оскільки зміни морфологічної структури поверхні, умов формування стоку та просторової неоднорідності властивостей ґрунтів безпосередньо впливають на результати оцінювання.

Розроблено інтегральний підхід до оцінювання придатності територій до забудови, що поєднує морфометричні характеристики рельєфу, інженерно-геологічні умови та показник антропогенної трансформації, реалізований через поетапну методику аналізу і бальну оцінку, що забезпечує класифікацію територій за умовами забудови та обґрунтування напрямів їх використання.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати можуть бути використані при вдосконаленні процедур інженерно-геоморфологічного районування територій, зокрема для диференціації ділянок за умовами забудови з урахуванням морфометричних характеристик рельєфу та ступеня його антропогенної трансформації, а також для обґрунтування проєктних рішень щодо розміщення об'єктів будівництва з урахуванням фактичного стану рельєфу [22].

Запропонований підхід доцільно застосовувати при розробленні містобудівної та проєктної документації для обґрунтування рішень щодо розміщення об'єктів будівництва, а також при оцінюванні інженерно-геологічних умов територій на етапах їх інженерної підготовки.

Використання інтегрального показника придатності території забезпечує формалізовану оцінку умов забудови та підвищує обґрунтованість прийняття проєктних рішень.

Література

1. Гудзевич А.В., Любченко В.Є., Броннікова Л.Ф., Гудзевич Л.С. Ландшафтний підхід до врахування регіональних особливостей організації природокористування природоохоронної території. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. серія «геологія. географія. екологія», випуск 52. С. 119-129. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2020-52-09 (дата звернення: 27.04.2026).
2. Сержантова Ю. Ю., Марченко О. І., Зеленчук І. Д. Використання новітніх технологій для моніторингу та збереження довкілля: Роль дронів, супутників та штучного інтелекту. Екологічні науки. Науково-практичний журнал. 2024. № 5(56). С. 182–188. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.5-56.27
3. 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
4. M. Panizza. Geomorphology and environmental impact assessment. *Geomorphology.* 2005. Vol. 66. P. 187–199. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.06.013
5. P. Carrión-Mero, N. Montalván-Burbano, N. Paz-Salas, F., et al. Evaluation of slope stability in an urban area as a basis for territorial planning. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, No. 11. Article 5013. DOI: https://doi.org/10.3390/app11115013
6. Зеленчук І. Д. Ландшафтно-геохімічна деструкція територій інтенсивного будівництва. *Acta Academiae Beregsasiensis: Geographica et Recreatio*. 2025. № 3. С. 28-40. DOI: https://doi.org/10.32782/2786-5843/2025-3-3
7. Байдіков І. А. Обґрунтування методики оцінювання рельєфу в контексті просторового планування території з метою її господарського використання. *Ландшафтознавство.* 2024. Т. 6, № 2. С. 54–63. DOI: https://doi.org/10.31652/2786-5665-2024-6-54-63
8. R. J. Chorley. Spatial analysis in geomorphology. *Spatial Analysis in Geomorphology*. London : Routledge, 1972. 14 p. URL:
1. https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9780429273346-2/general-geomorphometry-derivatives-altitude-descriptive-statistics-ian-evans?context=ubx (дата звернення: 27.04.2026).
9. S. A. Schumm. The fluvial system. New York *: John Wiley & Sons*, 1977. 338 p. URL: Earth Surface Processes and Landforms | Geomorphology Journal | Wiley Online Library (дата звернення: 27.04.2026).
10. Goudie A. The Human Impact on the Natural Environment. URL: The Human Impact on the Natural Environment : Past, Present and Future, Seventh Edition (дата звернення: 27.04.2026).
11. I. McHarg. Design with nature. New York, NY: Doubleday/Natural History Press. 1969. URL: Design with Nature: Ian McHarg's ecological wisdom as actionable and practical knowledge (дата звернення: 28.04.2026).
12. A. Zaniboni, P. Tassinari, D. Torreggiani. GIS-based land suitability analysis for the optimal location of integrated multi-trophic aquaponic systems. *Sustainable Cities and Society*. Volume 913. 25 February 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169790
13. Шищенко П. Г. Принципи і методи ландшафтного аналізу в регіональному проектуванні : монографія. Київ : Фітосоціоцентр, 1999. 284 с.
14. Шищенко П. Г., Денисик Г. І. Теоретичні проблеми ландшафтознавства. *Ландшафтознавство*. 2024. Т. 5, № 1. С. 6-14. DOI: https://doi.org/10.31652/2786-5665-2024-5-6-14

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

15. Гродзинський Д. М. Основи ландшафтної екологи: Підручник.- К. : Либідь 1993. - 224 с. URL: https://aokornus.at.ua/BOOKS/Grodzynsky.pdf (дата звернення: 28.04.2026).
16. Маринич О. М. Фізична географія України. Київ : Знання, 2003. - 511 с. URL: https://irbis-nbuv.gov.ua/ulib/item/ukr0000016739 (дата звернення: 28.04.2026).
17. ДБН Б.2.2-12:2019. *Планування та забудова територій*. Київ : Мінрегіон України, 2019. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/dbn_b_2_2_12/1-1-0-1802 (дата звернення: 28.04.2026).
18. Павловська Т. С. Геоморфологія : навч. посіб. Луцьк : Волин. нац. ун-т ім. Лесі Українки, 2022. 256 с. URL: https://evnuir.vnu.edu.ua/bitstream/123456789/21605/1/Heomorfolohiia.pdf (дата звернення: 28.04.2026).
19. Сонько, С. П., Зеленчук, І. Д., Новікова, Т. П. Промислове будівництво, як чинник деструкції природних ландшафтів і втрати потенціалу екосистемних послуг. Людина та довкілля. Проблеми неоекології. 2025. Вип. 43. С. 63-77. DOI: https://doi.org/10.26565/1992-4224-2025-43-05
20. Zelenchuk I. D. Landscape-ecological approaches to restoring natural landscapes and developing urban ecosystems the case of recreational zone construction in Kyiv / International scientific conference. Actual problems of natural sciences development amidst the evolution of artificial intelligence. December 25–26, 2024. Riga, the Republic of Latvia. С. 55–57. DOI: https://doi.org/10.30525/978-9934-26-521-1-13.
21. Зеленчук І. Д. Еколого-геоморфологічні трансформації інертних компонентів ланд-шафту індустріальних зон. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології.* 2025. Вип. 44. с.132-146. DOI: https://doi.org/10.26565/1992-4224-2025-44-10
22. Sonko, S. P., & Zelenchuk, I. D. (2024). Impact of construction on landscapes of the forest-step zone of Ukraine. *Man and Environment. Issues of Neoecology*, (42), с. 24-34. DOI: https://doi.org/10.26565/1992-4224-2024-42-02

Дата першого надходження статті до видання: 30.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 504.054:574.3
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.26

ДОСЛІДЖЕННЯ АКТИВНОСТІ КАЛІЮ-40 В ГРУНТІ БОТАНІЧНОГО САДУ, ПАРКОВИХ ТА УРБАЛАНДШАФТАХ МІСТА ЖИТОМИРА

Дунаєвська О.Ф., Борисюк Б.В., Сокульський І.М., Світельський М.М., Ковальчук О.М.
Поліський національний університет
бульв. Старий, 7, 10008, м. Житомир
oksana_fd@ukr.net, sokulskiy_1979@ukr.net

Велика кількість досліджень та нормативних документів присвячені вивченню розподілу і вмісту цезію-137 і стронцію-90 в об'єктах довкілля та продуктах харчування. Природний радіаційний фон утворюється переважно ізотопами земної кори: калій-40, радій-226, торій-232. Вміст певних природних радіонуклідів нормується: радій-226,228, торій-230,232, калій-40, радон-222, уран-238. торій-232, торій-230 у воді, мінеральних добривах, посуді з глини тощо. Калій-40 накопичується у рослинах, має високу питому активність в ґрунті, додатково вноситься разом з калійними добривами. Тому вивчення розподілу калію-40 в ґрунтах є актуальним науковим завданням.

Проби ґрунту, відібрані на території Ботанічного саду імені Героїв-десантників, парку відпочинку Шодуара м. Житомира, вулиці Університетська прибудинкової території, були проаналізовані на вміст калію-40 у сертифікованій Вимірювальній лабораторії Поліського національного університету на приладі гамма-бета-спектрометр МКС-АТ1315.

Питома активність ^{40}K в пробах ґрунту свідчить про його високий вміст (157,1 – 963,1 Бк/кг). Найвищий показник був відмічений у торфовому ґрунті водойми Ботанічного саду. Ґрунти Ботанічного саду не однорідні за видом та вмістом ^{40}K. Високу питому активність має технозем (380,2±17,4 Бк/кг), але найвища активність ^{40}K зафіксована у торф'яному ґрунті на березі водойми (963,1±41,9 Бк/кг). Високий вміст ^{40}K пояснюється горизонтальною міграцією на нижчий рівень (водойма) та утримання його за рахунок капілярної вологості ґрунту. Склад рослин територій впливає на вміст ^{40}K в ґрунті, оскільки виніс калію з ґрунту є видовим і родовим показником, відповідно, характеризується різним залишком в ґрунті. Питома активність ґрунту урболандшафту за ^{40}K не перевищує його кількість у ґрунті ботанічному саду, проте дещо вища за аналогічний показник Шодуарівського парку. Питома активність проб ґрунту з Шодуарівського парку становила значення в діапазоні 286,5 – 390,0 Бк/кг. Отримані результати потребують подальшого детального вивчення з обов'язковим аналізом вмісту цього ізотопу в різних формах та органах рослин. *Ключові слова:* калій-40, питома активність, ґрунт, ботанічний сад, парк, урболандшафт

Study of activity of potassium-40 in the soil of the botanical garden, parks and urban landscapes of the city of Zhytomyr. Dunaievska O., Borysiuk B., Sokulsky I., Svitelskyi M., Kovalchuk O.

A lot of research and regulatory documentation are devoted to studying the distribution and content of caesium-137 and strontium-90 in environmental materials and food products. Natural background radiation is primarily composed of isotopes found in the Earth's crust, such as potassium-40 (^{40}K), radium-226 and thorium-232. The content of certain natural radionuclides is regulated, including radium-226 and -228, thorium-230 and -232, ^{40}K, radon-222 and uranium-238 in water, mineral fertilisers and clay dishes. ^{40}K accumulates in plants and has a high specific activity in soil; it is also added to potash fertilisers. Therefore, studying the distribution of ^{40}K in soils is a relevant scientific objective.

Soil samples were taken from the Botanical Garden named after the Heroes; the Shoduar Recreation Park in Zhytomyr, area on Universytetska Street and analysed for their ^{40}K content at the certified Measurement Laboratory of Polissia National University using an MKS-AT1315 gamma-beta spectrometer.

The high specific activity of ^{40}K in soil samples (157.1–963.1 Bq/kg) indicates its significant presence. The highest value was recorded in the peat soil of the Botanical Garden reservoir. The soils in the Botanical Garden are heterogeneous in terms of both type and ^{40}K content. Although technosol has a high specific activity (380.2 ± 17.4 Bq/kg), the highest ^{40}K activity was recorded in the peat soil on the reservoir's shore (963.1 ± 41.9 Bq/kg). This high content can be explained by horizontal moisture migration to a lower level and retention. The composition of the plant life in an area affects the ^{40}K content of the soil since the removal of its from the soil varies depending on the species and genus, leaving different residues in the soil. The specific activity of ^{40}K in urban landscapes does not exceed that in the Botanical Garden but is higher than the similar indicator in Shoduarivsky Park. The specific activity of soil samples from Shoduarivsky Park ranged from 286.5 to 390.0 Bq/kg. Further detailed study is required to analyse the content of this isotope in various forms and plant organs. *Key words:* potassium-40, specific activity, soil, botanical garden, park, urban landscape

© Дунаєвська О.Ф., Борисюк Б.В., Сокульський І.М., Світельський М.М., Ковальчук О.М., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

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

Постановка проблеми. Іонізуюче випромінювання відоме людству з кінця XIX століття. Найбільше розповсюдженим його застосуванням у світі є використання рентгенівського випромінювання у медицині, створення ядерної зброї та атомних електричних станцій. Після аварії на четвертому енергоблоці Чорнобильської атомної електростанції у 1986 році територія нашої країни зазнала радіоактивного забруднення. Для проведення заходів з радіаційного захисту радіоактивно забруднені території були поділені на чотири зони, що зумовлено визначенням щільності забруднення ґрунту ізотопами цезію, стронцію, плутонію відповідно до Закону України від 27.02.1991 № 791а-XII «Про правовий режим території, що зазнала радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи». Основні критерії протирадіаційного захисту та радіаційної безпеки прописані в Державних гігієнічних нормативах "Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97)", які були введені в дію Постановою № 62 від 01.12.97 МОЗ України. Для регулювання дози внутрішнього опромінення населення і неперевищення річної ефективної дози в 1 мЗв у питній воді та продуктах харчування нормується вміст радіонуклідів цезію-137 та стронцію-90 (Державні гігієнічні нормативи "Допустимі рівні вмісту радіонуклідів Cs 137 та Sr 90 у продуктах харчування та питній воді": Наказ МОЗ України 03.05.2006 № 256), які можуть надходити за ланцюгом ґрунт-рослина-тварина-людина після забруднення ними довкілля в результаті Чорнобильської катастрофи. І хоча з моменту аварії на ЧАЕС пройшло майже сорок років, перевищення допустимих рівнів радіонуклідів цезію-137 та стронцію-90 спостерігали у продуктах харчування, особливо, зібраних у лісі [1]. Проте не слід забувати про існування природного радіаційного фону, утвореного переважно ізотопами земної кори [2]. Проведеними науковими дослідження встановлено значний вміст калію-40, радію-226, торію-232 в зразках ґрунту та воді [3, 4]. Вміст певних природних радіонуклідів згідно НРБУ-97 нормується: радій-226, торій-232, калій-40 у будівельних матеріалах і мінеральній сировині; радон-222, радій-226, радій-228 у воді господарсько-питного водопостачання; уран-238, торій-232, торій-230 у мінеральних добривах; радій-226, торій-232, калій-40 у посуді з глини тощо; уран-238, радій-226, торій-232 у мінеральних барвниках. Вагома частина досліджень вітчизняних науковців присвячена вивченню міграції та вмісту радіонуклідів, вивчення шляхів міграції, накопичення радіоактивних речовин, в тому числі природного походження, є актуальним та необхідним завданням для екологів, виробників продукції, в першу чергу, сільськогосподарської, медиків.

Актуальність дослідження. Визначення вмісту ^{40}K проводять в різних країнах. Так, в Центральному Іраку питома активність цього ізотопу у ґрунтах знаходилася в діапазоні 208 – 530 Бк/кг [5]. Питома активність за ^{40}K ґрунту Ефіопії мала значення 330 Бк/кг [6]. Дослідженнями вітчизняних науковців встановлено, що джерелом надходження калію-40 в довкілля, особливо, площ навколо ТЕЦ, є продукти спалювання вугілля, при цьому на таких територіях збільшується потужність експозиційної дози гамма-випромінювання [7]. Радіоекологічні дослідження прилеглої до полігонів побутових відходів виявили неоднорідність розповсюдження як техногенних, так і природних радіонуклідів, в тому числі калію-40, що створює додатковий радіаційний вплив на екосистеми [8]. Важливими є результати, отримані при вивченні накопичення калію-40 та інших радіоактивних ізотопів рослинами. Встановлено, що вегетативні частини люпину та еспарцету здатні до накопичення калію-40 у значно більших кількостях, ніж цезію-137 [9]. Таким чином, всебічне дослідження питомої активності калію-40 в складових довкілля, продукції рослинництва та тваринництва є важливим завданням радіоекології.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дане дослідження виконано відповідно до теми НДР «Моніторингові дослідження біосфери Українського Полісся», затвердженої у МОН України (державний реєстраційний номер 0124U000645).

Аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить про перспективність комплексних досліджень на вміст як природних, так і індустріальних (антропогенних, техногенно-підсилених) радіоактивних речовин. Такі дослідження дозволили Куценко М.І. (2024) встановити, що вегетативна маса фацелії пижмолистої накопичує калію-40 у вісім разів більше, ніж цезію-137, а радію-226 і торію-232 при цьому вдвічі та втричі менше відповідно. Саме цю рослину можна радити у якості фіторемедіанта, яка одночасно є медоносом, невибаглива до ґрунту, покращує його властивості та зменшує кислотність і, одночасно, у якості попередника буде знижувати вміст радіоактивних речовин у ґрунті [10]. Для підвищення врожайності використовують добрива органічного та неорганічного походження.

Праця авторського колективу Гангур В. В., Лень О. І., Гангур М. В. (2022) демонструє залежність врожайності культур не лише від родючості ґрунту, а й від обробітку. Обробіток ґрунту впливає на вміст азоту, калію, фосфору в ньому, його розподіл в шарах, а, значить, краще розкриває біологічний потенціал продуктивності [11]. Науковці Гамаюнова В.В., Сидякіна О.В. (2024) провели десятирічні дослідження балансу калію в ґрунті України та багатьох країн світу. Встановлено, що використання калійних добри у світі збільшилося майже на 40 %, середній показник внесення дорівнює 20,6 кг на 1 га. Виніс калію з ґрунту України також зріс на 41 % [12]. Значить, внесення калій-

них добрив буде зростати. Оскільки в мінеральних добривах присутній ізотоп калію-40, одномоментно буде привноситися і він в ґрунт та, очевидно, збільшувати показник питомої активності. Такі дані перспективно використовувати і у випадку вивчення розподілу калію-40. Врадій О. І.(2025) зазначає, що калій-40 має значний внесок у створенні природного радіаційного фону. Цей ізотоп також накопичується у рослинах, особливо родини бобових. Мінеральні добрива у вигляді калію хлориду сприяють додатковому внесенню, окрім калію-40, цезію-137, радію-226, торію-232 [13]. Таким чином, актуальним завданням радіоекології є вивчення вмісту природного радіонукліда калія-40 в ґрунті, оскільки за літературними джерелами він має істотний вплив на формування природного радіаційного фону, вноситься разом з мінеральними добривами та накопичується в рослинній продукції.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Метою статті є вивчення вмісту калію-40 в ґрунті різних ландшафтів міста Житомира – парку, ботанічного саду, прибудинкової території. Особливо важливим є визначення калію-40 в обєкті природно-заповідного фонду для створення карти розповсюдження радіонукліда в грунтах та отримання контрольного значення для сільськогосподарських земель, які отримують додаткове надходження цього радіоактивного ізотопу, наприклад, з калійними добривами.

Новизна. Ми започаткували визначення питомої активності калію-40 в зразках грунту на території міста Житомир. Це особливо цінне для подальших досліджень зразків грунту та порівняльного аналізу.

Загальнонаукове значення. Визначена питома активність зразків грунту ботанічного саду, паркової території та прибудинкових територій в місті Житомир дозволила окреслити його розповсюдження та висунути гіпотезу для подальших радіоекологічних досліджень.

Викладення основного матеріалу. Нами дослідження були проведені у березні-листопаді 2025 року.

Відбір зразків ґрунту проводили на території Ботанічного саду імені Героїв-десантників, парку відпочинку Шодуара м. Житомира, вулиці Університетська 59 прибудинкової території відповідно до вимог ДСТУ 4287:2004 «Якість ґрунту. Відбирання проб». Точкові проби отримували з використанням бура БП-25-15 на глибині 0-20 см. Точкові проби об'єднували у аналітичну пробу масою 1 кг. Радіологічні визначення калію-40 проводили у сертифікованій Вимірювальній лабораторії Поліського національного університету на приладі гамма-бета-спектрометр МКС-АТ1315 (АТОМТЕХ).

Характеристика ґрунту у місцях відбору проб та їх питома активність наведені в таблиці 1.

Отримані нами результати вмісту ^{40}K в ґрунті мають значення від 157,1 до 461,9 Бк/кг (табл. 1). Ботанічний сад Поліського університету належить до об'єктів природно-заповідного фонду, на території якого дозволена рекреаційна та наукова діяльність відповідно до закону України «Про природно-заповідний фонд України» (№ 2457-XII від 16.06.92). Ґрунти Ботанічного саду не однорідні за видом та вмістом ^{40}K. Високу питому активність має технозем (табл. 1), але найвища активність

Таблиця 1

Питома активність ґрунту за радіонуклідом ^{40}K в місцях відбору

№ точок	Місце відбору	Характеристика ґрунту та місця відбору	Питома активність, Бк/кг
1	Ботанічний сад	Темний сірий лісовий, непорушний, типовий	157,10±11,3
2	Ботанічний сад	Темний сірий лісовий, непорушний, типовий	461,9±26,7
3	Ботанічний сад	Темний сірий лісовий, непорушний, типовий	362,2±21,8
4	Ботанічний сад	Темний сірий опідзолений	307,2±19,6
5	Ботанічний сад	Лучний (привезений технозем)	380,2±17,4
6	Ботанічний сад	Торф'яний, водойма	963,1±41,9
7	Шодуарівський парк	Рекреаційна зона (початок парку), дерново- підзолистий	390,0±23,1
8	Шодуарівський парк	Рекреаційна зона (середина паркової зони), дерново- підзолистий	362,5±16,2
9	Шодуарівський парк	Рекреаційна зона, берег річки Тетерів, дерново-підзолистий	286,5±17,5
10	Шодуарівський парк	Донні осади річки Тетерів, піщаний	380,29±20,7
11	вул. Університетська	Дерново- підзолистий	414,13±9,8

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

^{40}K зафіксована у торф'яному ґрунті на березі водойми (табл. 1). Такий високий вміст ^{40}K можна пояснити попереднім застосуванням калійних добрив у навезеному ґрунті та горизонтальною міграцією ^{40}K на нижчий рівень (водойма) та утримання його за рахунок капілярної вологості ґрунту. Результати вмісту ^{40}K в точках 1-3 (табл. 1) мають різні значення, що ми пов'язуємо з різним видовим складом рослин цих територій. Так, у точці 1 основними представниками флори є бук, верба, глід, самшит, робінія; в точці 2 – горіх, дуб, ліщина, ялина; в точці 3 – барбарис, вишня, смородина, туя. Очевидно, що різним рослинам притаманний різний виніс калію з ґрунту і, відповідно, різним залишком в ґрунті. Шодуарівський парк є популярним рекреаційним об'єктом міста. Впродовж останніх десять років відбувається реконструкція та впорядкування паркової зони з висівом трав, насадженням дерев, що не виключає використання добрив та додаткового надходження ^{40}K. Питома активність ґрунту урболандшафту за ^{40}K не перевищує його кількість у ботанічному саду, який як об'єкт природно-заповідного фонду можна вважати за контрольне значення або природний радіаційний фон. Joel et al. (2021) визначили глобальний природний фон за ізотопом калію-40 в Нігерії до 330 Бк/кг, що не суперичить нашим дослідженням [14].

Головні висновки. Питома активність ^{40}K в пробах ґрунту свідчить про його високий вміст (157,1 – 963,1 Бк/кг). Найвищий показник був відмічений у торфовому ґрунті водойми Ботанічного саду. Такі результати потребують подальшого детального вивчення з обов'язковим аналізом вмісту цього ізотопу в різних формах та органах рослин. При викладанні навчальних дисциплін, що розглядають іонізуюче випромінювання, необхідно акцентувати увагу на протирадіаційному захисті та потенційній небезпеці використання радіоактивних речовин і вказувати на велику частку ^{40}K у ґрунті.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати питомої активності калію-40 в грунтах Ботанічного саду Поліського національного університету як обєкту природно-заповідного фонду, дозволяє їх використовувати як фонове або контрольне значення для оцінки питомої активності цього ізотопу в сільськогосподарських угіддях.

Література

1. Дунаєвська О., Ковальчук О., Махінько Р., Базильчук О. Радіоактивність за цезієм-137 та стронцієм-90 складових довкілля післячорнобильського періоду у 2024 році. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2025. Т. 16. № 1. С. 19-26. DOI: 10.69628/esbur/1.2025.19
2. Полякова І. О. Прихована радіаційна небезпека від джерел природного походження. Engineering sciences: development prospects in countries of Europe at thebeginning of the third millennium: Collective monograph. Volume 2. Riga : Izdevnieciba "Baltija Publishing", 2018. С. 269-296.
3. Дунаєвська О.Ф., Сокульський І.М., Ковальчук О.М., Махінько Р.Г. Результати проведення радіоекологічного моніторингу грунту за вмістом природного радіонукліду калій-40. *Екологічні науки.* 2025. № 2 (59). С. 135-139. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.2-59.20
4. Калда Г.С., Шевеля В.В., Рибалка К.А., Живець Я. Аналіз радіоактивного забруднення регіонів України та Польщі. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2022. No 6 (012).С. 59-55. DOI: https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.271222.59.911
5. Department of Environment, Ministry of Oil, Basra Oil Company, Basra, Iraq. Determining The Specific Activity of Radioactive Isotopes of, 226Ra,228A, 40K, 137Cs in The Soils of Selected Areas of Najaf city - Central Iraq. *International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)* (09.11.2022, Ankara, Turkey). 2022. pp. 1-7. DOI: 10.1109/HORA55278.2022.9799995
6. Tadesse Abate. The Activity Concentrations of Radionuclides 226Ra, 232Th and 40K of Soil Samples in the Case of Metekel Zone, Ethiopia. *EPJ Nuclear Sci. Technol.* 2022. 8 (14). P. 1-7. DOI: https://doi.org/10.1051/epjn/2022011
7. Оцінка радіаційної обстановки техногенного ландшафту Бурштинського району. В. А. Левченко, О.П. Петровський, Д. Ю. Юрченко та ін. *Галицький лікарський вісник.* 2016. Т. 23, число 1. С. 122-125. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/glv_2016_23_1_41.
8. Скиба Т. Радіаційно-екологічна оцінка екосистем у зонах техногенного навантаження (на прикладі сміттєзвалищ побутових відходів). Біологічні, хімічні та екологічні загрози під час війни : колективна монографія / за заг. ред. В. В. Поповича, В. О. Сергієнка, Н. О. Іванченко. Львів : ЛДУБЖД, 2025. С. 380–390. DOI: https://doi.org/10.32447/bcet.2025.25
9. Разанов С.Ф., Куценко М.І. Оцінка рівня накопичення радіонуклідів сільськогосподарськими бобовими нектаропилконосними рослинами в умовах північного Полісся. *Сільське господарство та лісівництво*. 2024. № 3 (34). С. 198-207. DOI: 10.37128/2707-5826-2024-3-17
10. Куценко М.І. Інтенсивність накопичення радіонуклідів вегетативною масою фацелії пижмолистої. *Таврійський науковий вісник. Серія: Сільськогосподарські науки.* 2024. № 139. Ч. 1. С. 273-279. DOI: https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.139.1.35
11. Гангур В. В. ., Лень О. І. ., Гангур М. В. Вплив різних систем обробітку на поживний режим ґрунту під пшеницею озимою та ячменем ярим в зоні лівобережного лісостепу України. *Scientific Progress & Innovations.* 2022. № 1. С. 38-44. https://doi.org/10.31210/visnyk2022.01.04
12. Гамаюнова В.В., Сидякіна О.В. Калійне живлення і його баланс в Україні та країнах світу. *Таврійський науковий вісник.* 2024. № 141. Частина 1. С. 38-52. DOI: https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.141.1.6

13. Врадій О. І. Вплив мінерального удобрення за вирощування соняшнику на питому активність ^{137}Cs, ^{40}K, ^{226}Ra та ^{232}Th у сірому лісовому грунті в умовах Лісостепу Правобережного: зб. матер. IV Міжнар. наук.-практ. конф. "*Vin Smart Eco*". 15-17 тр. 2025 р. Вінниця: ТОВ "Твори", 2025. С. 199-202.
14. In-situ assessment of natural terrestrial-radioactivity from Uranium-238 (^{238}U), Thorium-232 (^{232}Th) and Potassium-40 (^{40}K) in coastal urban-environment and its possible health implications. Joel E.S., Omeje M., Olawole O.C. et al. *Sci Rep.* 2021. Sep 2;11(1):17555. doi: 10.1038/s41598-021-96516-z.

Дата першого надходження статті до видання: 30.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 581.522.4:630*271:551.583(477.6)
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.27

АНАЛІЗ ГІГРОМОРФНОЇ СТРУКТУРИ ДЕНДРОЦЕНОЗІВ ПРОМИСЛОВИХ МІСТ У КОНТЕКСТІ СУЧАСНИХ ЗМІН ГІДРОТЕРМІЧНОГО РЕЖИМУ СТЕПОВОЇ ЗОНИ УКРАЇНИ

Суслова О.П.
Криворізький ботанічний сад НАН України
вул. Ботанічна, 50, 50089, м. Кривий Ріг
elenasuslova2901@gmail.com

В статті представлено результати ретроспективного аналізу таксономічного складу та екоморфної структури паркового дендроценозу Покровська за період 2011–2024 рр. Актуальність роботи зумовлена необхідністю пошуку шляхів збереження стійкості міських парків в умовах інтенсивної аридизації Північного Степу України. Аналіз динаміки ключових гідротермічних показників регіону дослідження виявив зниження гідротермічного коефіцієнта з 0,75 (2011 р) до 0,35 (2024 р), що свідчить про трансформацію кліматичних умов від помірної до сильної посухи та підтверджує тенденцію загальної аридизації. За результатами інвентаризації встановлено, що впродовж 14-річного періоду таксономічне різноманіття насаджень зросло на 91,5% (з 59 до 113 таксонів) за рахунок впровадження декоративних культиварів. Виявлено зміну стратегії формування дендроценозу: пріоритет змістився в бік ксеромезофітної групи, кількість таксонів якої зросла в 2,4 рази (з 18 до 44 одиниць), а її частка в структурі гігроморф досягла 38,9%. Основу цієї групи сучасного насадження становлять представники родів *Juniperus* L., *Pinus* L. та *Berberis* L., що демонструють високу декоративність в умовах температурного стресу та дефіциту вологи. З'ясовано високу ценотичну стійкість головних паркотвірних видів *Fraxinus excelsior* L. та *Quercus robur* L., чисельність яких за умов аридизації зменшилася на 0,9% та 0,4% відповідно. Сформульовано висновок, що життєздатність паркового дендроценозу в умовах кліматичних змін залежить від інтродукції ксеромезофітних видів. Доведено, що перехід до формування таксономічно різноманітних та посухостійких угруповань є необхідним превентивним заходом для збереження екологічних і рекреаційних функцій міських парків у посушливих умовах Степової зони України. *Ключові слова:* аридизація, гідротермічний коефіцієнт, дендроценоз, таксономічний склад, гігроморфи, ксеромезофіти, Північний Степ.

Analysis of the hygromorphic structure of dendrocenoses in industrial cities in the context of modern changes of the hydrothermal regime of the Steppe zone of Ukraine. Suslova O.

The article presents the results of a retrospective analysis of the taxonomic composition and ecomorphic structure of the park dendrocenosis in Pokrovsk for the period of 2011–2024. The relevance of the study is driven by the need to find ways to preserve the sustainability of urban parks under conditions of intensive aridization in the Northern Steppe of Ukraine. An analysis of the dynamics of key hydrothermal indicators in the study region revealed a decrease in the hydrothermal coefficient from 0.75 (2011) to 0.35 (2024), which indicates a transformation of climatic conditions from moderate to severe drought and confirms the trend of general aridization. Based on inventory results, it was established that over the 14-year period, the taxonomic diversity of the stands increased by 91.5% (from 59 to 113 taxa) due to the introduction of ornamental cultivars. A shift in the strategy of dendrocenosis formation was identified: the priority has moved toward the xeromesophytic group, the number of taxa of which increased 2.4 times (from 18 to 44 units), and its share in the hygromorphic structure reached 38.9%. The core of this group in the modern stands consists of representatives of the genera *Juniperus* L., *Pinus* L., and *Berberis* L., which exhibit high ornamental value under conditions of temperature stress and moisture deficit. The study confirmed high cenotic stability of the main park-forming species, *Fraxinus excelsior* L. and *Quercus robur* L., whose populations decreased by only 0.9% and 0.4%, respectively, under arid conditions. It is concluded that the viability of park dendrocenoses in the face of climate change depends on the introduction of xeromesophytic species. It is proved that the transition to the formation of taxonomically diverse and drought-resistant communities is a necessary preventive measure to preserve the ecological and recreational functions of urban parks in the arid conditions of the Steppe zone of Ukraine. *Key words:* aridization, hydrothermal coefficient, dendrocenosis, taxonomic composition, hygromorphs, xeromesophytes, Northern Steppe.

Постановка проблеми. Сучасний стан паркових дендроценозів у промислових містах Степової зони України характеризується структурною трансформацією внаслідок аридизації клімату в поєднанні із техногенним навантаженням. Проблема полягає у розриві між біологічними вимогами деревних насаджень та новими гідротермічними показниками. Сформована в XX столітті екологічна структура міських паркових насаджень Степової зони базувалася на принципах декоративності та швидкого росту, де домінуюча роль належала видам–мезофітам [1, 2]. Проте, зафіксоване впродовж останнього десятиліття зростання середньорічних температур на 11% та дефіцит опадів до 41% створило умови, за яких мезофільна фракція урбодендрофлори втрачає адаптивну здатність [7, 15]. Проблема ускладнюється «ефектом теплового острова» промислових міст, оскільки асфальтове покриття та ущільнені ґрунти блокують природну інфільтрацію вологи, а запиленість атмосфери порушує терморегуляцію

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

рослин [3]. Це призводить до деградації вразливих видів та їхньої стихійної заміни менш декоративними або інвазійними таксонами [12].

Актуальність дослідження. Посилення гідротермічної напруженості в Степовій зоні України зумовлює зміни в екологічній структурі урбоекосистем. Традиційні паркові дендроценози, сформовані переважно мезофітами, наразі перебувають у стані деградації. Невідповідність історичного видового складу сучасним кліматичним показникам призводить до процесу «екологічного заміщення», де чутливі види поступово елімінуються зі структури насаджень [14]. Тому виникає потреба в аналізі екологічного спектра дендрофлори, зокрема співвідношення груп рослин за їхніми вимогами до гідротермічного режиму [4, 11]. Визначення динаміки екологічної структури дозволяє не лише констатувати елімінацію вразливих видів, а й прогнозувати життєздатність міських паркових насаджень в довгостроковій перспективі [10, 13, 16]. Тому, дослідження екологічної структури міських паркових дендроценозів набуває особливої актуальності через необхідність визначення видів, найбільш адаптованих та стійких до кліматичних умов Степової зони України.

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

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питаннями трансформації екологічної структури міських дендроценозів за умов кліматичних змін займаються фахівці світової наукової спільноти. Науковці акцентують увагу на чутливості паркових насаджень до екстремальних температурних коливань. Вагомий внесок в розуміння цих процесів зробили C. Konijnendijk та S. Pauleit, які довели, що зміна гідротермічного режиму вимагає переходу від декоративного підходу в озелененні до концепції «кліматично адаптивних міських насаджень» [13,14]. Автори зазначають, що види–мезофіти, які домінували в насадженнях впродовж останніх 50 років, наразі втрачають життєздатність, спричиняючи спрощення екологічної структури дендроценозів. Дослідження H. Pretzsch та T. Rötzer свідчать про прискорене старіння дерев у містах через ефект «теплового острова» та дефіцит опадів. Ними встановлено, що в умовах зростання температури на 10–12% дерева знижують щільність крон та демонструють передчасну дефоліацію [15,16]. Екологічні аспекти ксерофітизації міських ландшафтів у регіонах із посушливим кліматом висвітлені у працях J. Yang та L. Chen. Дослідники підкреслюють, що успішна адаптація урбодендрофлори можлива за умови домінування видів із широкою екологічною пластичністю та глибокими кореневими системами, здатними витримувати тривалі бездощові періоди [10, 11]. M. Esperon-Rodriguez в своїх роботах доводить, що понад 50% наявних у містах видів до 2050 року можуть опинитися за межами своєї екологічної ніші, якщо не буде змінено підходи до формування екологічного спектра насаджень [12].

У вітчизняних виданнях фундаментальні засади аналізу екологічної структури насаджень та класифікації деревних рослин за гігроморфами закладені в працях О. Л. Бельгарда [1]. Низка дослідників свідчать, що в умовах промислових міст Степу екологічна структура дендроценозів залежить від ступеня антропогенної трансформації едафотопів та атмосферного забруднення, а успішність функціонування паркових насаджень визначається їхньою екологічною пластичністю [2, 4, 5]. С. І. Кузнецов із співавторами наголошують на необхідності перегляду традиційного асортименту міського озеленення через масову деградацію видів, які не витримують зростання температурного максимуму [6]. Стратегію виживання деревних рослин у техногенному середовищі за умов кліматичних змін на Сході України проаналізовано в працях О. З. Глухова та А. І. Сафонова [3]. Значну увагу приділено визначенню гігроморфної структури міських паркових дендроценозів Степу України на сучасному етапі розвитку [9]. Доведено, що зміна гідротермічного режиму призводить до поступового «зсуву» екологічного спектра дендроценозів у бік ксерофітизації [7]. Незважаючи на значний доробок фахівців, залишається недостатньо дослідженою динаміка трансформації екологічної структури паркових дендроценозів промислових міст Північного Степу України в умовах аридизації клімату. Це обумовлює необхідність уточнення екологічного складу сучасних дендроценозів для прогнозування їхнього подальшого розвитку.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Незважаючи на значну кількість праць, присвячених стійкості міських насаджень, низка питань залишається недостатньо висвітленою, зокрема наскільки швидко відбувається зсув екологічного спектра від мезофітних до ксероморфних угруповань у межах одного паркового насадження. Крім того, відсутність кількісної оцінки змін у структурі гігроморф заважає розробці обґрунтованих прогнозів щодо довговічності міських насаджень. Тому вважаємо, що аналіз динаміки гігроморфної структури урбодендрофлори в умовах Північного Степу сприятиме збереженню паркових дендроценозів та обґрунтуванню стратегії адаптивного озеленення населених пунктів Степової зони України.

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

Наукова новизна полягає в аналізі трансформації гігроморфної структури дендроценозів промислового міста Північного Степу в умовах посилення гідротермічного стресу. Вперше проаналізовано вектор ксерофітизації паркових насаджень, що виявляється у скороченні частки видів–мезофітів та домінуванні ксеромезофітних таксонів.

Матеріаил та методи дослідження. Об'єктами дослідження були види паркового дендроценозу Покровська, що репрезентують типову структуру насаджень промислових міст Північного Степу України. Розподіл видів за гігроморфами здійснювали за класифікацією О. Л. Бельгарда [1]. Гідротермічний коефіцієнт (ГТК) розраховували за спрощеною формулою Г. Т. Селянінова [8]:

$$ГТК = \frac{P}{0{,}1 \cdot \sum_{i=1}^{k}(Tmid_i \cdot ni)}$$, де

P – сумарна кількість опадів за досліджуваний період, мм;

T_{mid_i} – середня температура повітря і-го місяця, °С;

n_i – кількість днів у і-му місяці;

k – кількість місяців у періоді дослідження;

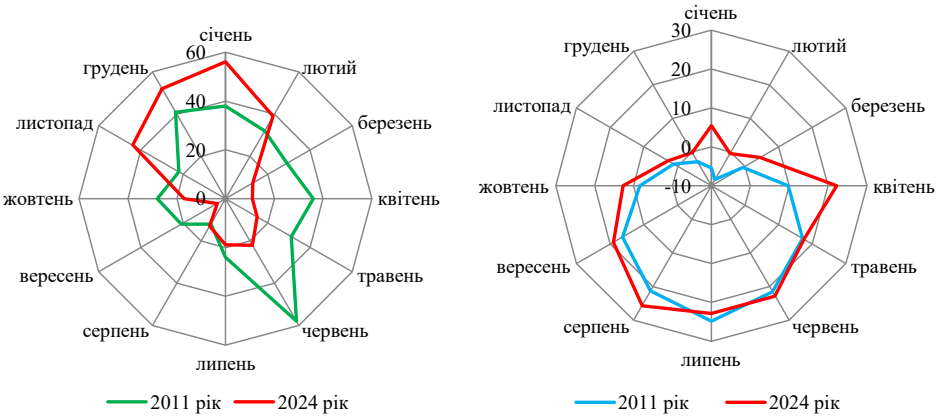
0,1 – постійний коефіцієнт.

До розрахунку включено місяці, де середня температура за місяць була вищою за +10°С (квітень–жовтень). Статистичну обробку отриманих результатів проводили з використанням програми *Excel*.

Викладення основного матеріалу. Для оцінки кліматичних змін в регіоні дослідження проаналізовано гідротермічні показники. Середня температура січня зросла з -5,4°С (2011 р) до +5,38°С (2024 р), що демонструє амплітуду майже в 11°С (рис. 1). Суттєве підвищення температури зафіксовано і в лютому: з -8,2°С (2011 р) до -0,4°С (2024 р). Такі аномально високі значення середньомісячної температури зумовлюють ранній початок вегетації, який спричиняє фізіологічне виснаження дерев та підвищує їхню вразливість до пізньо-весняних заморозків. Крім того, вегетаційний період 2024 року характеризувався суттєвим підвищенням температурного фону порівняно з 2011 роком; в травні–червні середньомісячні температури зросли на 1,0–1,3°С. В серпні 2024 року середня температура становила 19,1°С при критичному дефіциті опадів. Вересень 2024 року, незважаючи на дещо нижчі температурні показники порівняно з 2011 роком, відзначався значною сухістю, що подовжило період атмосферної посухи. Критичним для фази розпускання бруньок став дефіцит вологи в квітні 2024 року (лише 11 мм опадів проти 35 мм у 2011 р). В серпні 2024 року зафіксовано мінімальний рівень опадів – 4 мм. Для порівняння – у серпні 2011 року випало 12 мм опадів. Незважаючи на подібність річних сум опадів в досліджувані роки, в 2024 році спостерігався їх перерозподіл на зимовий період (листопад–грудень), що нівелює їхню доступність для рослин у період вегетації.

Розрахований гідротермічний коефіцієнт в 2011 році становив 0,75, що є типовим для помірної посухи. В 2024 році гідротермічний коефіцієнт знизився до 0,35, що свідчить про перехід до режиму сильної посухи та аридизацію клімату. Отже, порівняльний аналіз метеоданих виявив трансформацію кліматичних умов у районі дослідження.

За нашими даними впродовж 14-річного періоду (2011–2024 рр) кількість видів та культиварів у досліджуваному парковому насадженні зросла на 91,5% – з 59 до 113 таксонів (табл. 1). Порівняльний аналіз структури гігроморф виявив



А Б

Рис. 1. Середньомісячні гідротермічні показники в північно-степовій зоні України: А – кількість опадів (мм); Б – температура (t^0 С)

Таблиця 1

Видовий склад, чисельність та розподіл за гігроморфами деревних рослин в парковому дендроценозі Покровська

№ п/п	Вид/культивар	Кількість, шт	Траплаяння, %	Кількість, шт	Трапляння, %	Гігроморфа*
		2011 рік		2024 рік		
	Pinophyta					
1	*Larix decidua* Mill. ‘Pendula’	-	-	3	0,04	M
2	*Picea abies* (L.) Karst.	10	0,1	5	0,06	M
3	*Picea glauca* (Moench) Voss	3	0,04	1	0,01	M
4	*Picea glauca* (Moench) Voss ‘Conica’	-	-	10	0,1	M
5	*Picea pungens* Engelm.	174	2,3	192	2,46	Xm
6	*Picea pungens* Engelm. *F. argentea* Branner	87	1,2	80	1,0	Xm
7	*Pinus pallasiana* D. Don	8	0,1	7	0,1	Xm
8	*Pinus sylvestris* L.	3	0,04	2	0,02	Xm
9	*Pinus mugo* Turra ‘Winter Gold’	-	-	5	0,06	Xm
10	*Thuja occidentalis* L. ‘Smaragd’	-	-	20	0,35	M
11	*Thuja occidentalis* L. ‘Brabant’	-	-	45	0,6	M
12	*Thuja occidentalis* L. ‘Columna’	-	-	5	0,06	M
13	*Thuja occidentalis* L. ‘Spiralis’	-	-	3	0,04	M
14	*Juniperus communis* L.	5	0,1	2	0,02	Xm
15	*Juniperus communis* L. ‘Hibernica’	-	-	7	0,1	Xm
16	*Juniperus communis* L. ‘Green carpet’	-	-	15	0,2	Xm
17	*Juniperus communis* L. ‘Repanda’	-	-	12	0,2	Xm
18	*Juniperus communis* L. ‘Horstmann’	-	-	3	0,04	Xm
19	*Juniperus horizontalis* L. ‘Blue Chip’	-	-	30	0,4	Xm
20	*Juniperus horizontalis* L. ‘Wiltonii’	-	-	15	0,2	Xm
21	*Juniperus horizontalis* L. ‘Andorra Compact’	-	-	45	0,6	Xm
22	*Juniperus horizontalis* L. ‘Golden Carpet’	-	-	36	0,4	Xm
23	*Juniperus horizontalis* L. ‘Prince of Wales’	-	-	18	0,2	Xm
24	*Juniperus ×media* Melle ‘Mint Julep’	-	-	30	0,4	Xm
25	*Juniperus ×media* Melle ‘Old Gold’	-	-	34	0,4	Xm
26	*Juniperus ×media* Melle ‘King of Spring’	-	-	21	0,3	Xm
27	*Juniperus ×media* Melle ‘Pfitzeriana Aurea’	-	-	17	0,2	Xm
28	*Juniperus ×media* Melle ‘Mordigan Gold’	-	-	38	0,5	Xm
29	*Juniperus ×media* Melle ‘Blue and Gold’	-	-	16	0,2	Xm
30	*Juniperus sabina* L. ‘Tamariscifolia’	50	0,7	35	0,4	X
31	*Juniperus squamata* Lamb. ‘Blue Carpet’	-	-	14	0,2	Xm
32	*Juniperus virginiana* L. ‘Blue Arrow’	-	-	12	0,2	Xm
33	*Juniperus virginiana* L. ‘Grey Owl’	-	-	8	0,1	Xm
34	*Thuja occidentalis* L. ‘Globosa’	-	-	25	0,3	M
35	*Thuja occidentalis* L. ‘Golden glob’	-	-	5	0,06	M
36	*Thuja occidentalis* L. ‘Hoseri’	-	-	9	0,1	M
37	*Thuja occidentalis* L. ‘Rheingold’	-	-	5	0,06	M
38	*Thuja occidentalis* L. ‘Little Champion’	-	-	16	0,2	M
	Magnoliophyta					
39	*Acer negundo* L.	143	1,9	150	1,9	M
40	*Acer platanoides* L.	90	1,2	84	1,0	M
41	*Acer platanoides* L. ‘Crimson King’	-	-	12	0,2	M
42	*Acer platanoides* L. ‘Drummondii’	-	-	4	0,05	M
43	*Acer platanoides* L. ‘Globosum’	-	-	28	0,3	M
44	*Acer pseudoplatanus* L.	73	1,0	67	0,8	M

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

Продовження таблиці 1

45	*Acer saccharinum* L.	34	0,5	30	0,4	M
46	*Acer tataricum* L.	42	0,6	54	0,7	Xm
47	*Aesculus hippocastanum* L.	97	1,3	118	1,5	M
48	*Ailantus altissima* (Mill.) Swingle	14	0,2	10	0,1	X
49	*Armeniaca vulgaris* Lam.	3	0,04	5	0,06	Xm
50	*Betula pendula* Roth	75	1,0	66	0,8	M
51	*Betula pendula* Roth 'Youngii'	-	-	5	0,06	M
52	*Betula pubescens* Ehrh.	7	0,1	6	0,07	Hm
53	*Catalpa bignonioides* Walt.	6	0,1	20	0,3	M
54	*Catalpa bignonioides* Walt. 'Globosa'	-	-	15	0,2	M
55	*Crataegus sanguinea* Pall.	1	0,01	1	0,01	Xm
56	*Elaeagnus angustifolia* L.	3	0,04	10	0,1	X
57	*Fraxinus excelsior* L.	2801	37,3	2775	34,2	M
58	*Fraxinus excelsior* L. 'Aurea Pendula'	-	-	3	0,04	M
59	*Fraxinus lanceolata* Borkh.	86	1,2	83	1,0	M
60	*Fraxinus pennsylvanica* Marsh	1	0,01	1	0,01	M
61	*Ginkgo biloba* L. 'Pendula'	-	-	3	0,04	M
62	*Gleditsia triacanthos* L.	10	0,1	1	0,01	X
63	*Gleditsia triacanthos f. inermis* (L.) Zbl.	15	0,2	12	0,2	X
64	*Juglans regia* L.	7	0,1	2	0,02	M
65	*Malus ×purpurea* (Barbier) Rehder	12	0,2	9	0,1	M
66	*Malus domestica* Borkh.	41	0,6	53	0,7	M
67	*Malus praecox* (Pall.) Borkh.	4	0,1	2	0,02	Xm
68	*Malus sylvestris* (L.) Mill.	3	0,04	1	0,01	M
69	*Morus alba* L.	14	0,2	9	0,1	X
70	*Padellus mahaleb* (L.) Vass.	17	0,3	11	0,1	X
71	*Padus avium* Mill.	69	0,9	56	0,7	Hm
72	*Platanus ×acerifolia* (Aiton) Willd.	-	-	28	0,3	M
73	*Populus ×canadensis* Moench	9	0,1	2	0,02	Hm
74	*Populus bolleana* Lauche	32	0,4	14	0,2	Xm
75	*Populus nigra* L.	17	0,3	3	0,04	Hm
76	*Populus pyramidalis* Spach.	10	0,1	6	0,07	M
77	*Populus simonii* Carriere	36	0,5	14	0,2	Xm
78	*Prunus serrulata* Thunb.	-	-	14	0,2	M
79	*Prunus divaricata* Ledeb.	7	0,1	2	0,02	Xm
80	*Prunus ×domestica* L.	18	0,3	7	0,09	M
81	*Pyrus communis* L.	24	0,4	16	0,2	Xm
82	*Quercus robur* L.	2400	32,0	2391	29,4	Xm
83	*Robinia pseudoacacia* L.	450	6,0	392	4,8	X
84	*Robinia pseudoacacia* L. 'Umbraculifera'	8	0,1	3	0,04	X
85	*Salix alba* L.	15	0,2	1	0,01	H
86	*Sorbus aucuparia* L.	44	0,6	13	0,16	M
87	*Sorbus aucuparia* L. 'Pendula'	-	-	7	0,09	M
88	*Sorbus intermedia* (Ehrh.) Pers.	23	0,4	5	0,06	Xm
89	*Tilia cordata* Mill.	46	0,6	35	0,4	M
90	*Tilia platyphyllos* Scop.	40	0,5	34	0,4	M
91	*Ulmus minor* Mill.	39	0,5	16	0,2	Xm
92	*Ulmus laevis* Pall.	16	0,2	3	0,04	M
93	*Ulmus parvifolia* Jacq.	28	0,4	16	0,2	Xm
94	*Ulmus glabra* Huds.	28	0,4	26	0,3	M
95	*Berberis vulgaris* L. 'Atropurpurea'	-	-	20	0,3	Xm
96	*Berberis thunbergii* DC. 'Golden Ring'	-	-	12	0,2	Xm

Продовження таблиці 1

97	*Berberis thunbergii* DC. 'Green Carpet'	-	-	30	0,4	Xm
98	*Berberis thunbergii* DC. 'Red Pillar'	-	-	30	0,4	Xm
99	*Berberis thunbergii* DC. 'Admiration'	-	-	16	0,2	Xm
100	*Buxus sempervirens* L.	-	-	50	0,6	Xm
101	*Cerasus vulgaris* Mill.	9	0,1	8	0,1	Xm
102	*Cotoneaster horizontalis* Decne.	-	-	10	0,1	Xm
103	*Cornus mas* L.	31	0,4	10	0,1	Xm
104	*Ligustrum vulgare* L.	105	1,4	105	1,3	M
105	*Hydrangea arborescens* L. 'Annabelle'	-	-	18	0,2	Hm
106	*Hydrangea paniculata* Siebold 'Vanille Fraise'	-	-	12	0,2	M
107	*Physocarpus opulifolius* L. 'Diablo'	-	-	21	0,3	M
108	*Physocarpus opulifolius* L. 'Luteus'	-	-	20	0,3	M
109	*Syringa vulgare* L.	17	0,2	10	0,1	M
110	*Spiraea ×cinerea* Zab.	-	-	9	0,1	M
111	*Spiraea japonica* L. 'Gold flame'	-	-	37	0,5	M
112	*Spiraea japonica* L. 'Little Princess'	-	-	29	0,4	M
113	*Spiraea ×vanhouttei* (Briot) Zal.	43	0,6	76	0,9	M
	Всього	7503	100	8123	100	

Примітка*: X – ксерофіти, Xm – ксеромезофіти, M – мезофіти, Hm – гігромезофіти, H – гігрофіти

зміну таксономічної стратегії розвитку дендроценозу. Якщо у 2011 році сумарна частка мезофітів та ксеромезофітів становила 78% від загальної кількості видів, то до 2024 року спостерігається суттєве розширення асортименту за рахунок ксеромезофітної групи, частка якої зросла на 8,4% – від 18 до 44 таксонів. (табл. 2). Це найбільш адаптована група в умовах сучасного гідротермічного режиму Північного Степу. За рахунок нових культиварів (*Juniperus* L., *Pinus* L., *Berberis* L.) відбувається поступова заміна вразливих порід, що доцільно для збереження стійкості паркових насаджень в умовах аридизації. Група мезофітів за кількістю таксонів зросла з 28 до 53 одиниць, проте їхня частка в загальній структурі залишилася майже незмінною (~47%). Кількість ксерофітів лишилася стабільною, що на фоні загального розширення списку призвело до зниження їхньої частки з 15,3% до 8%. Види цієї групи максимально адаптовані до аридних умов і не потребують активного сортового оновлення. Гігрофіти та гігро-мезофіти переходять в групу рослин, що потребують інтенсивного штучного поливу.

Окремої уваги заслуговує стан основних паркотвірних видів. Незважаючи на критичне зниження зволоженості, *Fraxinus excelsior* виявив високу ценотичну стійкість. Його популяція залишилася практично незмінною і становила 2800 екземплярів у 2011 році та 2775 – у 2024 році (див. табл. 1). Скорочення чисельності лише на 0,9% свідчить про стійкість деревостану до кліматичних змін. Схожа тенденція стабільності характерна і для *Quercus robur*. Водночас, стратегія розвитку парку змістилася від підтримки монодомінантних насаджень до розширення таксономічного різноманіття переважно за рахунок ксеромезофітних інтродуцентів, що є доцільним заходом на випадок подальшого посилення посухи. Таким чином, порівняльний аналіз структури гігроморф за період 2011–2024 рр дозволив визначити, що стабілізація паркового дендроценозу відбувається не за рахунок природного відбору існуючих видів, а шляхом інтродукції ксеромезофітної групи, частка якої зросла до 38,9%.

Головні висновки:

1. Встановлено аридизацію клімату в Північному Степу України за період 2011–2024 рр, про що свідчить зниження гідротермічного коефіцієнта з 0,75 до 0,35. Таке зміщення є лімітуючим фактором, що перешкоджає нормальному функціонуванню мезофільної групи рослин.

2. За 14-річний період таксономічний склад паркового дендроценозу збільшився на 91,5% (з 59 до 113 таксонів). Найбільше поповнення зафіксовано у групі ксеромезофітів: їхня кількість зросла у 2,4 раза (з 18 до 44 таксонів), а питома вага у загальній структурі досягла 38,9%. Це відбулося за рахунок впровадження нових культиварів роду *Juniperus* та *Berberis*, найбільш адаптованих до сучасного гідротермічного режиму Північного Степу.

3. Встановлено високу адаптивність *Fraxinus excelsior* та *Quercus robur* до тривалого гідротермального стресу. За 14 років спостережень кількісний склад їхніх насаджень залишався стабільним (зменшення на 0,9% та 0,4% відповідно), що свідчить про резистентність видів до тривалих періодів атмосферної та ґрунтової посухи.

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

Таблиця 2

Динаміка гігроморфної структури дендрофлори міського парку Покровська (2011–2024 рр)

Гігроморфа	2011 рік		2024 рік	
	кількість таксонів, шт	%	кількість таксонів, шт	%
Ксерофіти	9	15,3	9	8,0
Ксеромезофіти	18	30,5	44	38,9
Мезофіти	28	47,5	53	46,9
Гігрофіти / Гігро-мезофіти	4	6,8	6	5,3%
Разом	59	100	113	100

4. З'ясовано, що оптимізація структури паркового дендроценозу в умовах прогресуючої аридизації забезпечується через цілеспрямоване використання ксеромезофітних видів. Формування таксономічно різноманітних та посухостійких угруповань є пріоритетним превентивним заходом, необхідним для збереження життєздатності та екологічних функцій міських парків у Степовій зоні України.

Література

1. Бельгард О. Л**.** Степове лісівництво. М.: Лісова пром-сть, 1971. 336 с.
2. Бессонова В. П. Стан деревних рослин в умовах техногенного середовища та методи його оцінки. Дніпропетровськ : Вид-во ДНУ, 2006. 192 с.
3. Глухов О. З., Сафонов А. І. Екологічна специфіка міських дендроценозів в умовах техногенезу. Донецьк : Ноулідж, 2011. 240 с.
4. Грицан Ю. П. Екологічні основи перетворюючого впливу лісової рослинності на степове середовище (екотоп, взаємодія, дендроіндикація, типологія). Дніпропетровськ : Вид-во ДНУ, 2000. 294 с.
5. Котовський С. Ю., Курдюк О. М. Адаптація інтродукованих деревних рослин до умов аридності. *Вісник Харківського національного аграрного університету*. 2018. № 2. С. 45–52.
6. Кузнецов С. І., Кушнір А. І., Левон Ф. М., Пушкар В. В., Суханова О. А., Кузнецова М. С., Гончаренко Б. В. Асортимент дерев, кущів та ліан для ландшафтного будівництва України. К.: ЦП «КОМПРИНТ», 2020. 321 с.
7. Лихолат Ю. В., Хромих Н. О., Дідур О. О., Оковитий С. І., Матюха, В. Л., Савосько В. М., Лихолат Т. Ю. Сучасний стан антропогенної трансформації екосистем степового Придніпров'я. Кривий Ріг : ФОП Чернявський, 2019. 146 с.
8. Польовий А. М., Божко Л. Ю., Вольвач О. В. Основи агрометеорології. Одеса : ТБС, 2012. 250 с.
9. Суслова О. П. Посухостійкість деревних рослин в паркових насадженнях промислових міст степової зони України. Екологічні науки. 2025. 3(60). С. 147–152. https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.3-60.27
10. Chen L., Zhang Y. 2021. Land-use changes lead to a decrease in carbon storage in arid region, China. *Ecological Indicators.* 127. Art. 107770. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107770
11. Darabi H., Moarrab Y., Balist J., Naroei B. 2023. Resilient plant species selection for urban green infrastructure development in arid regions: a case of Qom, Iran. *Urban Ecosystems* 26(3). P. 1–18. https://doi.org/10.1007/s11252-023-01410-3
12. Esperon-Rodriguez M., Gallagher R., Power S. A. 2024. Climate change may severely compromise urban forest ecosystem services across North America and Europe. *Research Square*. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-9195677/v1
13. Konijnendijk C. C. 2023. Evidence-based guidelines for greener, healthier, and more resilient cities: Introducing the 3-30-300 rule. *Journal of Forestry Research.* 34(3). P. 821–830. https://doi.org/10.1007/s11676-022-01523-z
14. Pauleit S., Erlwein S., Feder S., Linke S., Zölch T. 2025. Climate Resilient Green Cities of the Future: Building Evidence for Action. *Built Environment*. 51(4). P. 588–613. https://doi.org/10.2148/benv.51.4.588
15. Pretzsch H., Biber P., Uhl E. 2017. Climate change accelerates growth of urban trees in metropolises worldwide. *Scientific Reports*. Art. 15403. https://doi.org/10.1038/s41598-017-14831-w
16. Rötzer T., Moser-Reischl A., Rahman M. Urban tree growth and ecosystem services under extreme drought. 2021. *Agricultural and Forest Meteorology*. 308-309(17):108532. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108532

Дата першого надходження статті до видання: 27.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

ЕКОЛОГІЯ АНТРОПОГЕННО ТРАНСФОРМОВАНОГО СЕРЕДОВИЩА

УДК [591.524:598.278-042.4]:591.95](045)
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.28

АДАПТАЦІЇ ЖИВИХ ОРГАНІЗМІВ ДО АНТРОПОГЕННО ТРАНСФОРМОВАНОГО СЕРЕДОВИЩА: МОРФОФУНКЦІОНАЛЬНІ, ПОВЕДІНКОВІ ТА ЕВОЛЮЦІЙНІ АСПЕКТИ НА ПРИКЛАДІ ОДУДА (*UPUPA EPOPS* L.)

Соболенко Л.Ю., Мороз Л.М., Сорокіна С.В.
Уманський національний університет
вул. Садова 2, 20300 м. Умань
sobolenko@ukr.net

У статті досліджено механізми адаптації одуда (*Upupa epops* Linnaeus, 1758) до умов урбанізованого середовища Правобережного Лісостепу України (на прикладі Уманського регіону). Метою роботи є порівняльний аналіз репродуктивних показників та екологічних стратегій виду в біотопах з різним ступенем антропогенного навантаження: дендропарку «Софіївка» та приміському масиві «Білогрудівський ліс». Актуальність дослідження зумовлена необхідністю моніторингу процесів синантропізації та оцінки життєздатності популяцій птахів у трансформованих ландшафтах.

Моніторинг здійснювався протягом гніздових періодів 2023–2025 рр. Проаналізовано фенологію прильоту, морфометрію яєць (n=20), величину кладок та успішність гніздування за стандартними орнітологічними методиками. Виконано статистичну обробку даних (M±m) та розраховано трофічну роль виду через хронометраж годування пташенят (30 годин спостережень).

Встановлено, що щільність популяції в обох біотопах є стабільною (0,1–0,2 ос./га). Виявлено відмінності в репродуктивному успіху: у дендропарку «Софіївка» середня величина кладки становила 5,14 ± 1,24 яєць при успішності гніздування 75,0 ± 10,9%. У приміському лісі ці показники склали 5,67 ± 0,94 та 61,76 ± 20,9% відповідно. Нижча успішність у лісовому масиві пояснюється інтенсивнішим антропогенним пресингом та вищим рівнем елімінації через фактор турбування. Одуди демонструють високу прихильність до гнізд та адаптивну поведінку при виборі екотонних зон для фуражування.

Розраховано значну біоценотичну роль виду: за період гніздування одна пара здійснює близько 2800 кормових візитів, елімінуючи понад 20 000 безхребетних (переважно комах-фітофагів). Це підтверджує важливу роль одуда як біологічного агента захисту зелених насаджень. Висока успішність розмноження в умовах дендропарку свідчить про значний адаптивний потенціал виду до урбанізації за умови збереження специфічних гніздових стацій. *Ключові слова:* одуд (*Upupa epops* Lin., 1758), успішність гніздування, антропогенна трансформація, урбоценоз, репродуктивні показники, синантропізація, Правобережний Лісостеп.

Adaptations of living organisms to anthropogenically transformed environments: morphofunctional, behavioral, and evolutionary aspects (on the example of the hoopoe, *Upupa epops L.*). Sobolenko, L., Moroz, L., Sorokina, S.

The article investigates the adaptation mechanisms of the Hoopoe (*Upupa epops* Linnaeus, 1758) to the urbanized environments of the Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine (Uman region). The study aims to conduct a comparative analysis of reproductive parameters and ecological strategies of the species in biotopes with varying degrees of anthropogenic pressure: the "Sofiyivka" National Dendrological Park and the suburban "Bilohrudivskyi Forest". The research is relevant due to the need to monitor synanthropization processes and assess the viability of bird populations in transformed landscapes.

Monitoring was conducted during the nesting periods of 2023–2025. Arrival phenology, egg morphometrics (n =20), clutch size, and nesting success were analyzed using standard ornithological methods. Statistical data processing (M±m) was performed, and the species' trophic role was calculated based on the timing of nestling feeding (30 hours of observation).

It was established that population density in both biotopes remains stable (0,1–0,2 individuals/ha). Differences in reproductive success were identified: in "Sofiyivka" Park, the mean clutch size was 5,14 ± 1,24 eggs with a nesting success of 75,0 ± 10,9%. In the suburban forest, these figures were 5,67 ± 0,94 and 61,76 ± 20,9%, respectively. The lower success in the suburban forest is attributed to more intense anthropogenic pressure and higher elimination rates due to disturbance factors. Hoopoes demonstrate high nest site fidelity and adaptive behavior in selecting ecotone zones for foraging.

A significant biocenotic role of the species was calculated: during the nesting period, one pair makes approximately 2800 foraging visits, eliminating over 20000 invertebrates (mainly phytophagous insects). This confirms the Hoopoe's importance as a biological agent for the protection of green spaces. The high breeding success in the dendrological park indicates the species significant adaptive potential to urbanization, provided that specific nesting habitats are preserved. *Key words:* hoopoe (*Upupa epops* Linnaeus, 1758), nesting success, anthropogenic transformation, urbocenosis, reproductive parameters, synanthropization, Right-Bank Forest-Steppe.

© Соболенко Л.Ю., Мороз Л.М., Сорокіна С.В., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

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

Постановка проблеми. Чисельність популяції виступає фундаментальним індикатором життєздатності та загального екологічного стану виду в межах конкретного біотопу. У сучасній орнітології особлива увага приділяється аналізу кількісних показників, оскільки вони інтегрують у собі відповідні реакції організмів на комплексний вплив природних змін та антропогенної трансформації середовища [10].

Актуальність дослідження. Моніторинг динаміки чисельності дозволяє не лише оцінити поточний стан популяції, а й спрогнозувати її адаптивний потенціал в умовах зростаючого техногенного навантаження та глобальних кліматичних викликів.

У природних екосистемах популяції часто демонструють відносну стабільність чисельності протягом тривалих періодів, але одночасно мають сезонні та багаторічні коливання, що зумовлені змінами в життєвому циклі, кліматичних умовах та інших екологічних факторах [14]. .

Ключовими детермінантами популяційної динаміки залишаються показники репродуктивного потенціалу та рівень елімінації особин, оскільки параметри життєвої історії (середня продуктивність, виживання молодих і дорослих особин) визначають темпи росту популяцій у птахів [12].

Для орнітофауни швидкість відтворення пов'язана з параметрами гніздової біології (розмір кладки, успішність вилуплення та вильоту) і формує інтегральні індикатори успішності гніздування, що критично впливають на виживання виду в антропогенно трансформованих ландшафтах [3].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження екологічних аспектів та репродуктивного успіху одуда (*Upupa epops* L.) проводилося в умовах міських та приміських лісопаркових урбоценозів Уманщини – репрезентативного регіону центральної частини Правобережного Лісостепу України. Ключовими модельними територіями були обрані Національний дендрологічний парк «Софіївка» НАН України та приміський лісовий масив «Білогрудівський ліс». Обидва об'єкти є штучними лісопарковими насадженнями значної площі (150 та 200 га відповідно), що функціонують в умовах постійного антропогенного пресингу [1]. Попри спільне походження, ці території характеризуються специфічними еколого-біогеоценотичними параметрами та різним ступенем рекреаційного навантаження. Така антропогенна активність може змінювати структуру орнітокомплексів, безпосередньо впливати на щільність популяцій та успішність гніздування птахів, оскільки в багатьох випадках рекреаційні активності спричиняють порушення біотопів і поведінки під час розмноження, що веде до зниження продуктивності гніздування [13].

На території України одуд (*Upupa epops* L.) має статус звичайного гніздового перелітного виду, поширеного в усіх регіонах. Типовими місцями гніздування птаха є дупла дерев, проте вид демонструє значну екологічну пластичність, використовуючи антропогенні об'єкти: ніші під дахами будівель, порожнини в купах деревини або каменю [5].

Наші дослідження підтверджують тенденцію до освоєння одудом урбанізованих ландшафтів, зокрема великих міських парків та приміських лісових масивів. Зокрема, у 2025 році на території Національного дендрологічного парку «Софіївка» було зафіксовано гніздування однієї пари, тоді як у Білогрудівському лісовому масиві – двох пар.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасній орнітологічній літературі види птахів, що мешкають у мозаїчних і змінених людьми ландшафтах, часто розглядаються як такі, що демонструють адаптивні реакції на антропогенні чинники середовища. Так, у дослідженні вибору середовища та харчової екології одуд показано використання різних компонентів культурного ландшафту в межах ареалу, що узгоджується з концепцією синантропізації в орнітології [6].

Аналіз процесів синантропізації орнітофауни в Україні також підкреслює важливість адаптацій птахів до антропогенних ландшафтів як складової сучасної орнітології [2].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Екологічні аспекти життєдіяльності одуда на території України, зокрема в межах Правобережного Лісостепу, тривалий час залишалися поза увагою дослідників. Особливо відчутним є дефіцит ґрунтовних моніторингових даних щодо адаптаційних стратегій виду в умовах міських та приміських урбоценозів Центрального регіону. Відсутність цілеспрямованих досліджень екології одуда в урбанізованих біотопах протягом останніх десятиліть зумовлює необхідність детального аналізу параметрів його гніздування для розуміння механізмів синантропізації птахів.

Новизна. Встановлено, що щільність популяції одуда в досліджуваних урбоценозах Уманщини зберігає стабільність (0,1–0,2 ос./га). Виявлено специфічні відмінності в репродуктивному успіху між заповідним об'єктом («Софіївка») та приміським масивом. Вперше для даного регіону проведено комплексну оцінку біоценотичної ролі виду через екстраполяцію даних інтенсивності годівлі пташенят в умовах антропогенного пресингу.

Методологічне або загальнонаукове значення. Моніторинг репродуктивних показників одуда здійснювався протягом гніздових періодів у межах визначених модельних територій. Для дистанційного обстеження вмісту дупел і мінімізації фактора турбування птахів у польових дослідженнях широко застосовують спеціалізовані оптичні системи, зокрема відеокамери, змонтовані на телескопічних штангах, що дозволяють проводити верифікацію кладок і контроль стану виводків без прямого втручання в архітектоніку гнізда. Такі методи збільшують безпеку

польових робіт та відповідають сучасним етичним стандартам досліджень дуплогніздових птахів [8].

Кількісний аналіз репродуктивних параметрів (величина кладки, кількість яєць, виживаність пташенят) проводився згідно з уніфікованими методиками орнітологічного моніторингу [7]. Розрахунок інтегрального показника успішності гніздування (УГ) здійснювався за формулою:

$$УГ = (\sum N_{pull} / \sum N_{egg}) \times 100\%,$$

де:

N_{egg} – загальна кількість відкладених яєць у контрольованих кладках;

N_{pull} – загальна кількість пташенят, що успішно вилупилися та досягли віку вильоту з гнізда.

Статистична обробка отриманих даних виконувалася з використанням сучасних програмних пакетів для біологічних досліджень (наприклад, SPSS, R, SAS), що дозволяє визначити середні значення (M±m) та оцінити вірогідність отриманих результатів шляхом виконання відповідних статистичних тестів та побудови довірчих інтервалів [9].

Викладення основного матеріалу. Згідно з результатами проведених досліджень, одуд класифікується як відносно нечисленний, проте стабільний гніздовий компонент орнітофауни великих садово-паркових масивів та приміських лісових екосистем. Ключовим лімітуючим фактором його поширення є наявність старовікових дуплистих дерев, придатних для облаштування гнізд. У межах досліджуваних урбоценозів щільність популяції виду демонструвала відносну стабільність і коливалася в діапазоні 0,1–0,2 ос./га.

У ході моніторингових досліджень весняної міграції відмічено появу перших особин одуда в період із 5 по 11 квітня 2024 року. Встановлено, що безпосередньо після прильоту птахи демонструють вибірковість у використанні біотопів, надаючи перевагу екотонним зонам – окраїнам парків, що межують із відкритими ландшафтами (луками, агроценозами, садами). Такі стації забезпечують оптимальні умови для фуражування. Важливою екологічною вимогою виду є наявність ділянок із відкритим м'яким ґрунтом, розпушеним субстратом або антропогенними субстратами, де концентрується значна кількість ґрунтових безхребетних. Тісний зв'язок одуда з доступністю м'якого ґрунту, що є необхідною умовою для специфічного способу добування їжі (зондування), виступає одним із визначальних факторів просторового розподілу виду в трансформованому середовищі [11].

Початок репродуктивного циклу одуда в досліджуваному регіоні припадає на третю декаду квітня – першу декаду травня. У процесі дослідження зафіксовано такі дати початку гніздування: 27 квітня 2023 року (дендропарк Софіївка) та 3 травня 2024 року (урочище Білогрудівський ліс). Дещо пізні терміни гніздування зумовлюють високу міжвидову конкуренцію за місця облаштування гнізд: на момент активного пошуку гніздівель одудами більшість оптимальних дупел уже зайняті іншими видами-дуплогніздниками.

Систематичні спостереження за 7 випадками гніздування в дендропарку «Софіївка» засвідчили, що одуди віддають перевагу великим природним порожнинам у стовбурах старовікових дерев. Характерною особливістю є низьке розташування гнізд – у діапазоні від 0,4 до 1,2 м над рівнем ґрунту. Власне гніздо як складна споруда відсутнє; відкладання яєць відбувається безпосередньо на дно дупла, вистелене шаром деревної трухлявини та дрібних тріcок. У деяких випадках зафіксовано наявність незначної кількості сухих стебел трав, пір'я та шерсті ссавців, що виконують функцію примітивної підстилки.

Морфометричні параметри яєць (n = 20) продемонстрували певну варіативність: максимальні розміри склали 31,8 x 21,9 мм, мінімальні – 28,1 x 19,0 мм. Середня маса свіжого яйця становить 4,75 г (n = 11). Повні кладки в умовах досліджуваних урбоценозів містили від 3 до 7 яєць (табл. 1). Така мінливість величини кладки є типовою для виду і залежить від віку самки та кормових умов конкретного сезону.

Результати досліджень свідчать про певні відмінності в репродуктивних показниках одуда залежно від еколого-ценотичних умов локацій (табл. 1, 2). В умовах дендропарку «Софіївка» середня величина кладки становила 5,14 ± 1,24 яєць. Із загальної кількості відкладених яєць (n = 36) стадію вильоту успішно пройшли 27 пташенят. Таким чином, середня величина виводка склала 3,86 ± 0,56 особини, а інтегральний показник успішності гніздування – 75,0 ± 10,9 %. Варто зауважити, що одна з контрольованих кладок (мінімальна за обсягом – 3 яйця) виявилася повністю елімінованою через зовнішні фактори.

У Білогрудівському лісовому масиві було проаналізовано 6 гніздових циклів. Порівняльний аналіз демонструє, що попри дещо вищу середню кількість яєць у кладках приміської зони, загальна ефективність розмноження там була нижчою. Така варіативність успішності гніздування між центральним парком та приміським лісом може бути зумовлена різною інтенсивністю пресорної дії хижаків та специфікою мікрокліматичних умов у штучних насадженнях різного типу. Отримані нами дані корелюють із сучасними дослідженнями синантропних популяцій дуплогніздників: зокрема, еколого-фауністичний аналіз показав, що успішність розмноження дендрофільних птахів різко змінюється залежно від типу трансформованого середовища, де в лісопаркових зонах репродуктивні показники є нижчими порівняно із заповідними територіями [3].

Детальний аналіз репродуктивних параметрів одуда в умовах приміської лісової зони «Білогрудівський ліс» виявив значну варіативність обсягу кладок. Згідно з отриманими даними, розпо-

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

Таблиця 1

Успішність гніздування одуда (дендропарк «Софіївка»), M ± m, n = 36.

Величина кладки, (шт. яєць)	Кількість кладок під спостереженням (шт.)		Всього яєць (шт.)	Вилетіло пташенят (особин)	Успішність гніздування (%)
	шт.	%			
3	1	14,28	3	-	0,0
4	1	14,28	4	4	100,0
5	2	28,57	10	9	90.0
6	2	28,57	12	9	75.0
7	1	14,28	7	5	71,43
Всього	7	100,0	36	27	75.0 ±10.9
Середнє	-	-	5,14 ±1,24	3,86 ± 0,56	-

Таблиця 2

Успішність гніздування одуда (Уманська приміська лісова зона «Білогрудівський ліс»); M ± m, n = 34.

Величина кладки, (шт. яєць)	Кількість кладок під спостереженням (шт.)		Всього яєць (шт.)	Вилетіло пташенят (особин)	Успішність гніздування (%)
	шт.	%			
4	1	16,67	4	4	100,0
5	1	16,67	5	-	0,0
6	3	50,0	18	11	61.11
7	1	16,67	7	6	85,71
Всього	6	100,0	34	21	61,76 + 20,90
Середнє	-	-	5,67 ± 0,94	3,5 + 1, 12	-

діл кількості яєць у гніздах (n=6) мав такий характер: кладки з 4 та 5 яєць реєструвалися з однаковою частотою (16,67%), тоді як найбільш репрезентативною групою виявилися кладки, що містили 6 яєць – їх частка склала 50,0%. Максимальний обсяг (7 яєць) зафіксовано в одній кладці (16,67%).

Загальний репродуктивний фонд досліджуваних гнізд становив 34 яйця. Розрахункова середня величина кладки для даного біотопу дорівнює 5,67 ± 0,94 яєць. Порівняльний аналіз із результатами, отриманими в дендропарку «Софіївка», вказує на те, що в умовах приміського лісу середня величина кладки є вищою (різниця становить близько 0,5 яйця). Така тенденція до збільшення кількості яєць у менш трансформованих, порівняно з центральною міською зоною, лісових масивах може пояснюватися кращою доступністю специфічних кормових ресурсів на етапі формування яєць. Подібно до інших дуплогніздників, в одуда (*Upupa epops L.*) репродуктивні показники залежать від доступності безхребетних у ґрунті та на поверхні, що корелює з результатами сучасних досліджень трофічних умов у трансформованих лісових екосистемах Північно-Східної України [4].

Ефективність розмноження одуда в умовах Білогрудівського лісового масиву виявилася нижчою порівняно з парковими зонами. Із 34 яєць, зафіксованих у шести кладках, успішно вилупилося та досягло стадії вильоту 21 пташеня. Середня величина виводка становила 3,5 ± 1,12 особини, що на 0,36 менше, ніж аналогічний показник у дендропарку «Софіївка». Успішність гніздування одуда демонструвала значну варіативність у межах вибірки (від 61,11% до 100%), проте середній показник склав 61,76 ± 20,9%, що на 13,24% поступається результатам, отриманим у дендропарку. Така депресія репродуктивного успіху в приміській лісовій зоні, ймовірно, обумовлена менш сприятливими екологічними умовами та вищим рівнем антропогенного тиску, зокрема фактором турбування і меншою ефективністю природоохоронних заходів порівняно із заповідним статусом дендропарку. Ці спостереження корелюють із сучасними даними про вплив антропогенних трансформацій середовища на репродуктивні показники дуплогніздників у Північно-Східній Україні, де показано, що зростання антропогенного навантаження знижує успішність кладок у трансформованих лісових масивах [4].

Етологічні спостереження за інкубаційним періодом засвідчили, що одуди приступають до насиджування переважно після завершення відкладання яєць. Хоча в літературі є дані про перебування самки в гнізді вже після першого яйця, сучасні спо-

стереження в трансформованих лісопаркових і дендропаркових зонах Північно-Східної України підтверджують, що терміни насиджування пов'язані з доступністю кормових ресурсів та рівнем антропогенного впливу [4].

Наші дані підтверджують поступове зростання щільності насиджування у одуда. У процесі інкубації беруть участь обидва птахи, проте основна роль належить самці. У другій половині терміну насиджування спостерігається висока прихильність до гнізда: зафіксовано випадки, коли потурбована самка поверталася до дупла вже через 6 хвилин після вимушеного вильоту. Тривалість інкубаційного періоду в досліджуваних урбоценозах становила 15–17 діб, що відповідає видовим нормам для Центральної Європи та співпадає з результатами сучасних досліджень дуплогніздників у трансформованих лісових екосистемах Північно-Східної України [4].

Тривалість перебування пташенят одуда в гнізді (нідикольний період) варіювала в межах 21–24 діб. Протягом цього часу спостерігався інтенсивний приріст маси тіла: від 4,8–5,0 г при вилупленні до 55–60 г перед вильотом. Аналіз динаміки росту, проведений шляхом періодичного зважування двох виводків з інтервалом у 5 діб, засвідчив нерівномірність цього процесу. Найвища інтенсивність приросту маси фіксувалася до 10-денного віку, коли пташенята досягали 45–48 г, після чого темпи росту суттєво сповільнювалися, а енергія метаболізму переключалася на диференціацію тканин та формування оперення.

Паралельно з морфометричними дослідженнями було проведено хронометраж прильотів батьківських особин із кормом (табл. 3). Загальний час спостережень склав 30 годин, протягом яких було зафіксовано 228 випадків годівлі, що відповідає середній інтенсивності 7,6 прильотів за годину. Частота годівлі демонструвала залежність від віку пташенят та екологічних факторів, проте найбільш висока активність фуражування простежувалася протягом першого тижня життя молодняку, що узгоджується з даними про високі енергетичні потреби пташенят у період активного росту [4].

Екстраполяція отриманих даних щодо інтенсивності годівлі дозволяє оцінити біоценотичну роль одуда в досліджуваних урбоценозах. Виходячи із середньої частоти прильотів (7,6 рази на годину) та середньої тривалості перебування пташенят у гнізді (22 доби, або приблизно 366 годин активного світлового часу за весь період вигодовування), встановлено, що для забезпечення життєдіяльності одного виводка батьківська пара здійснює близько 2800 кормових візитів.

Враховуючи, що за один приліт птах може транспортувати кілька кормових об'єктів, загальна кількість знищених безхребетних за період гніздування одного виводка становить понад 3000 екземплярів. Протягом усього репродуктивного сезону сумарна активність однієї пари одудів разом із виводком призводить до елімінації близько 20 000 безхребетних тварин.

Оскільки значну частку раціону одуда становлять личинки комах-фітофагів та інші групи безхребетних, що є потенційними шкідниками лісопаркових культур, цей вид відіграє критично важливу роль у підтримці екологічного балансу та біологічному захисті зелених насаджень в умовах антропогенно трансформованого середовища.

Головні висновки. У структурі орнітофауни лісопаркових урбоценозів Уманщини одуд (*Upupa epops L.*) класифікується як нечисленний, проте стабільний гніздовий вид. У межах модельних територій – Національного дендропарку «Софіївка» та приміського масиву «Білогрудівський ліс» – щільність популяції виду зберігається на рівні 0,1–0,2 ос./га.

Порівняльний аналіз репродуктивних показників виявив специфіку адаптації виду до різних типів антропогенного навантаження. У дендропарку «Софіївка» середня величина кладки становить 5,14 ± 1,24 яйця при успішності гніздування 75,0 ± 10,9 %. У приміській лісовій зоні, попри дещо вищу середню кількість яєць у кладці (5,67 ± 0,94), зафіксовано нижчий рівень успішності гніздування – 61,76 ± 20,9 %. Середня величина виводка в парковій зоні склала 3,86 ± 0,56 пташеняти проти 3,5 ± 1,12 у лісовому масиві.

Встановлено, що заповідний статус та цілеспрямовані природоохоронні заходи в умовах дендропарку є ефективнішими для відтворення популяції, ніж умови приміського лісу. Вища успішність

Таблиця 3

Частота прильоту одудів з їжею до гнізда

Вік пташенят у днях	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	Разом
Кількість годин спостережень	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	30
Кількість прильотів за час чергування	28	29	18	26	20	18	38	16	22	13	228
Кількість прильотів за 1 годину (середнє)	9,3	9,7	6,0	8,7	6,7	6,0	12,7	5,3	7,3	4,3	7,6 1

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

розмноження в «Софіївці» свідчить про те, що за умови збереження старовікових дерев та контролю за екосистемою, одуд здатний успішно адаптуватися навіть до умов інтенсивного рекреаційного впливу.

З огляду на високу інтенсивність вигодовування (близько 2800 прильотів з кормом за період гніздування) та значну кількість знищених комах-фітофагів (біля 20 000 особин на одну пару за сезон), одуд виступає важливим біологічним агентом у забезпеченні екологічної стійкості та санітарного стану міських зелених насаджень.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати моніторингу можуть бути використані для розробки заходів з охорони дуплогніздних птахів в урбанізованому середовищі, а також для оцінки стану біологічного захисту лісопаркових зон. Подальші дослідження мають бути спрямовані на аналіз трофічних зв'язків виду в умовах трансформації кормової бази.

Література

1. Косенко І. С. «Софіївка» – шедевр садово-паркового мистецтва 18–19 сторіч на 225-році від її заснування. *Автохтонні та інтродуковані рослини*. 2021. № 1. С. 6–18. DOI: https://doi.org/10.37555/2707-3114.1.2021.247346
2. Мєдвєдєва І. В., Венгжин Е., Леньовскі К., Прокопчук А. В. Синантропізація орнітофауни: переваги, фактори ризику, механізми адаптації. *Матеріали XXIII Всеукраїнської наукової конференції молодих учених.* Львів, 15–16 травня 2025 р. DOI: https://doi.org/10.5923/j.ijge.20241201.03
3. Чаплигіна А. Б. Еколого-фаунистичний аналіз і успішність розмноження дендрофільних птахів на трансформованих територіях Північно-Східної України. *Studia Biologica*. 2015. Vol. 9, № 2. DOI: https://doi.org/10.30970/sbi.0902.410
4. Чаплигіна А. Б., Пахомов О. Ю., Бригадиренко В. В. Trophic links of the song thrush (*Turdus philomelos*) in transformed forest ecosystems of North Eastern Ukraine. *Biosystems Diversity*. 2020. DOI: https://doi.org/10.15421/011908
5. Фесенко Г. В., Бокотей А. А. Птахи фауни України: польовий визначник. 4-те вид. Київ, 2002. 416 с. URL: https://surl.li/hrkklm (дата звернення: 10.02.2026)
6. Barbaro L., Couzi L., Bretagnolle V., Nezan J., Vetillard F. Multi scale habitat selection and foraging ecology of the Eurasian Hoopoe (*Upupa epops*) in pine plantations. *Biodiversity and Conservation*. 2008. Vol. 17, No. 5. P. 1073–1087. DOI: https://doi.org/10.1007/s10531-007-9241-z
7. Bibby C. J., Burgess N. D., Hill D. A. *Bird Census Techniques*. London: Academic Press, 1992. 257 c. DOI: https://doi.org/10.1016/C2009-0-03531-4
8. Huebner D. P., Hurteau S. R. An economical wireless cavity nest viewer. *Journal of Field Ornithology*. 2007. Vol. 78, No. 1. P. 87–92. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1557-9263.2007.00009.x
9. Johnson M. Statistical Analysis Software Programs in Biomedical Research. *Mater Methods*. 2014. Vol. 4:1282. DOI: https://doi.org/10.13070/mm.en.4.1282
10. Matuoka M. A., Benchimol M., Almeida-Rocha J. M. D., Morante-Filho J. C. Effects of anthropogenic disturbances on bird functional diversity: a global meta-analysis. *Ecological Indicators*. 2020. Vol. 116. 106471. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106471
11. Podletnik M., Denac D. Selection of foraging habitat and diet of the Hoopoe (*Upupa epops*) in the mosaic-like cultural landscape of Goričko (NE Slovenia). *Acrocephalus*. 2015. Vol. 36. P. 109–132. DOI: https://doi.org/10.1515/acro-2015-0008
12. Stahl J. T., Oli M. K. Relative importance of avian life-history variables to population growth rate. *Ecological Modelling*. 2006. Vol. 198, Issues 1–2. P. 23–39. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.04.001
13. Steven R., Pickering C., Castley J. G. A review of the impacts of nature-based recreation on birds. *Journal of Environmental Management*. 2011. Vol. 92, No. 10. P. 2287–2294. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.05.005
14. Taylor R. A., White A., Sherratt J. A. How do variations in seasonality affect population cycles? *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2013. Vol. 280, No. 1754. 20122714. DOI: https://doi.org/10.1098/rspb.2012.2714

Дата першого надходження статті до видання: 28.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

UDC 623.454.2
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.29

HUMANITARIAN DEMINING OF THE BLACK SEA UNDER ENVIRONMENTAL CHALLENGES, TECHNOLOGICAL SOLUTIONS AND STATE PERMIT REGULATION

Zhmud V., Kot I.T., Hrebeniuk T.V., Bronytskyi V.O.
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
Beresteysky Ave., 37? 03056, Kyiv
t.hrebeniuk07@gmail.com, kotivantarasovich@gmail.com,
vadim.bronytskyy@gmail.com, gusinnokentii@gmail.com

The full-scale military aggression against Ukraine has transformed the Black Sea into a zone of critical mine danger and ecological crisis, requiring coordinated state permit regulation of demining activities. The destruction of the Kakhovka Hydroelectric Power Plant dam in June 2023 dramatically worsened the situation by triggering the uncontrolled drift of naval mines, anti-landing obstacles, and unexploded ordnance into the marine ecosystem. This paper presents a comprehensive analysis of current mine contamination in the Black Sea, highlighting the contradiction between urgent navigation safety needs and the prohibitive cost of traditional demining methods for Ukraine's wartime budget and regulatory constraints. Special attention is paid to the ecological impact of underwater explosions on marine biodiversity, particularly the critically endangered Black Sea harbor porpoise. Mathematical modelling of hydroacoustic shockwaves using Cole's equations demonstrates that standard high-order detonation creates lethal zones of up to 450 m and permanent hearing-loss zones of up to 1.8 km for cetaceans. Based on a systematic review of literature and available technologies, a three-stage "Cost-Effective Green Demining" strategy is proposed, integrating satellite GIS drift modelling, swarms of domestic autonomous underwater vehicles (AUVs), and low-order deflagration neutralization. An operational case study for the Grain Corridor approaches demonstrates a 4.8× speed gain and a 34× cost reduction compared to conventional methods. The proposed approach reduces the acoustic footprint of demining by a factor of 20–30 and enables Ukraine to attract international environmental funding unavailable for purely military projects. The study also emphasizes the role of engineering drawing and 3D CAD modelling in the design, standardization and local manufacturing of modular AUV/ROV platforms for marine demining. *Key words:* humanitarian demining, Black Sea, naval mines, ecological safety, underwater robotics, Kakhovka HPP, autonomous underwater vehicles, green demining, state permit regulation.

Гуманітарне розмінування Чорного моря в умовах екологічних викликів, технологічних рішень та регулювання державних дозволів. Жмуд В., Кот І.Т., Гребенюк Т.В., Броницький В.О.
Повномасштабна військова агресія проти України перетворила Чорне море на зону критичної мінної небезпеки та екологічної кризи, що вимагає скоординованого державного дозвільного регулювання діяльності з розмінування. Руйнування дамби Каховської гідроелектростанції у червні 2023 року різко погіршило ситуацію, спровокувавши неконтрольований дрейф морських мін, протидесантних перешкод та невибухлих боєприпасів у морську екосистему. У цій статті представлено комплексний аналіз поточного мінного забруднення Чорного моря, що підкреслює суперечність між нагальними потребами безпеки судноплавства та непомірною вартістю традиційних методів розмінування для воєнного бюджету України та регуляторних обмежень. Особлива увага приділяється екологічному впливу підводних вибухів на морське біорізноманіття, зокрема на зникаючу чорноморську морську свиню. Математичне моделювання гідроакустичних ударних хвиль з використанням рівнянь Коула демонструє, що стандартна детонація високого порядку створює смертельні зони до 450 м та зони постійної втрати слуху до 1,8 км для китоподібних. На основі систематичного огляду літератури та доступних технологій запропоновано триетапну стратегію «Економічно ефективного зеленого розмінування», що інтегрує моделювання дрейфу супутникової ГІС, рої вітчизняних автономних підводних апаратів (АНПА) та нейтралізацію дефлаграції низького порядку. Оперативне дослідження підходів «Зернового коридору» демонструє 4,8-кратне збільшення швидкості та 34-кратне зниження вартості порівняно з традиційними методами. Запропонований підхід зменшує акустичний слід розмінування в 20–30 разів і дозволяє Україні залучати міжнародне фінансування екологічних проєктів, недоступне для суто військових проєктів. У дослідженні також підкреслюється роль технічного креслення та 3D-моделювання в CAD-системах у процесі проєктування, стандартизації та місцевого виробництва модульних платформ AUV/ROV для розмінування морських акваторій. *Ключові слова:* гуманітарне розмінування, Чорне море, морські міни, екологічна безпека, підводна робототехніка, Каховська ГЕС, автономні підводні апарати, зелене розмінування.

Problem statement. The Black Sea has historically served as a vital transport corridor and a unique ecological system. Since February 2022, Russian naval forces have extensively mined Ukrainian coastal waters, blocking sea lanes and creating a persistent threat to civilian navigation. The situation reached a critical point on June 6, 2023, when the destruction of the Kakhovka HPP dam caused a massive discharge of explosive ordnance into

© Zhmud V., Kot I.T., Hrebeniuk T.V., Bronytskyi V.O. 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

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

the Black Sea, transforming its north-western shelf into a navigation "grey zone." Humanitarian demining in this context poses a complex dilemma: traditional large mine-sweeping vessels are prohibitively expensive for Ukraine's wartime budget, and standard in-situ detonation generates lethal hydroacoustic shockwaves that threaten the already critically endangered Black Sea harbor porpoise. There is therefore an urgent need for a strategy that is both economically viable and ecologically safe.

Allocation of previously unresolved parts of the general problem. The legal and economic framework for demining is analyzed by Ustymenko et al. [1], who demonstrate that the scale of contamination exceeds state budget capacity and that international donors increasingly require "green" standards. Ivanov [2] confirms Ukraine's obligations under international conventions to address military-related marine pollution. Hrytsaienko [3] advocates agile project-based management, while Bespalko et al. [4] propose a mathematical prioritization model for maximizing economic recovery per unit of expenditure.

The ecological dimension is documented by Tuchkovenko and Stepanenko [5], whose empirical data shows that the desalination and pollution plume from the Kakhovka disaster carried mine-risk objects into previously safe areas. Lebid et al. [6] validate GIS satellite monitoring as the primary tool for tracking mine drift vectors. Soloviov and Strilets [8] quantify how conventional blasting creates local "dead zones," arguing for non-contact neutralization. Karpiuk [7] warns that without intervention, ecosystem recovery could take decades.

On the technological front, Hassan et al. [9] review the global shift toward AI-driven detection and robotics. Chesnakov [10] and Vyrvykhvost [11] demonstrate Ukraine's industrial capacity to produce cost-effective modular AUV platforms capable of operating in turbid post-flood water using high-frequency multibeam sonar. Historical analysis by Boşneagu [12] and Akhundov [13] shows that post-WWII "brute force" trawling took over a decade and is inapplicable to the modern ecological context.

Methodological framework. The study treats Black Sea humanitarian demining as a multi-variable optimization problem balancing three conflicting parameters: Security (S), Economy (E), and Biodiversity (B), seeking a Pareto-optimal solution, while incorporating constraints of state permit regulation and environmental authorization procedures governing demining operations in marine areas. Four integrated methods are applied.

GIS overlay analysis superimposes mine drift vectors (derived from ERA5 retrospective wind and current data post-Kakhovka) onto biodiversity hotspot layers (Zernov's Phyllophora Field, dolphin migration routes) to identify high-priority non-contact zones and reduce the physical search area, taking into account regulatory restrictions on operations within environmentally sensitive and protected marine zones.

Mathematical modelling of hydroacoustic shockwaves uses Cole's empirical equations for shallow brackish water. Peak pressure $P_{max} = K \cdot (W^{1/3}/R)^{\alpha}$ ($K=52.4$, $\alpha=1.13$ for TNT) and impulse $I = Ki \cdot W^{1/3} \cdot (W^{1/3}/R)^{\beta}$ are calculated for two scenarios: Scenario A – high-order detonation of a PDM-1M mine (10 kg TNT); Scenario B – low-order deflagration (0.05 kg charge), with consideration of permissible impact thresholds established by environmental regulatory frameworks.

Technical comparative assessment evaluates a NATO SeaFox disposal vehicle (>$15,000/shot, single-use) against a domestic reusable ROV prototype equipped with a 750 kHz/1.2 MHz multibeam sonar providing 2 mm resolution at 10 m range in zero-visibility conditions [10], including compliance with technical certification and operational permitting requirements for maritime robotic systems and also an analysis of design documentation, 3D models, component layouts, and suitability for mass production.

Economic modelling applies a direct cost-per-km² formula Ctotal = (Cfuel + Ccrew + Camort) / (Acoverage / Tsurvey) to compare traditional mine-sweeping with robotic swarm approaches, providing quantitative justification for international donors, while also accounting for costs associated with obtaining permits, environmental assessments, and regulatory compliance procedures.

Presentation of the main material. Mine threat landscape. The Black Sea presents a heterogeneous threat: Soviet-era anchored mines (YaRM, MYaM types) that may break free during storms; drifting riverine mines (PDM series) introduced by the Kakhovka flood; and extensive UXO on the seabed. GIS analysis of hydrological data [6] identifies three critical accumulation zones driven by south-westward Dnipro-Bug current: the Kinburn Spit area, Odesa Bay littoral, and the Danube Biosphere Reserve coast – all lying astride the Grain Corridor shipping lanes.

Ecological risk assessment. Two ecological risks are quantified. First, chemical contamination: corrosion of submerged munitions releases TNT and RDX degradation products, which enter the food chain through mollusks and fish. Second, acoustic trauma: simulation results for Scenario A (PDM-1M, 10 kg TNT) indicate a Lethal Injury Zone (100% mortality) of 450 m radius and a Permanent Threshold Shift zone of 1.8 km. For echolocating species, deafness is ecologically equivalent to death [7]. Behavioral disturbance extends to 12 km from the epicenter. Scenario B (deflagration, 0.05 kg) reduces these to <15 m and <60 m respectively – a 20–30× reduction in acoustic footprint.

"Cost-Effective Green Demining" strategy. The proposed three-phase strategy is structured as follows.

Phase 1 – Remote Monitoring and Risk Mapping. Satellite imagery and GIS drift modelling replace continuous ship patrols, identifying large debris patches and predicting mine trajectories. This concentrates expensive resources on high-probability sectors,

reducing the physical search area by an estimated 60–70%.

Phase 2 – Robotic Identification. Swarms of 5–10 small-class domestic AUVs – each equipped with side-scan sonar and magnetometer – scan sectors in parallel formation, achieving 5× the survey speed of a single large vessel. Domestic platforms [10] use modular architecture repairable in field conditions, unlike imported analogs requiring overseas servicing.

Phase 3 – Eco-Friendly Neutralization. Once a threat is confirmed, ROV-mounted disruptors apply deflagration: a small shaped charge burns out the explosive without high-order detonation. For floating mines, robotic tugs tow objects to shallow sandy beaches for land disposal, negating acoustic marine impact entirely.

Economic feasibility. The robotic approach operates at approximately 5% of the cost of traditional naval demining (daily OPEX ratio 1:40). Critically, framing demining as an ecological rescue mission enables access to EU Life Programme, UN Environment Programme, and Green Climate Fund grants that are unavailable for purely military operations – aligning with the donor-funding rationale of Ustymenko et al. [1].

Case study: Grain Corridor approaches (Chornomorsk sector). A simulation for a 10 km² fairway sector (depth 15–20 m, silty seabed, estimated density 0.5 objects/km²) compared two approaches. Simulation A (Sandown-class mine-sweeper): 12 h mission, 5 high-order detonations in a biologically active zone, estimated cost $120,000. Simulation B (swarm of 5 domestic AUVs from RHIB): 2.5 h mission, 5 deflagration events with acoustic impact radius <50 m, estimated cost $3,500. Result: 4.8× speed gain, 34× cost reduction, negligible ecological impact.

SWOT analysis

The SWOT matrix reveals that Strengths (low cost, ecological safety) and Opportunities (international funding, export potential) heavily outweigh Weaknesses that are primarily technical and addressable through iterative R&D. The primary Threats are external and military, reinforcing the case for unmanned systems: the loss of a drone to enemy action is acceptable; the loss of a crewed vessel is not.

Main conclusions

1. Critical state of security and ecology. The Black Sea faces a dual crisis from intensive mine contamination and the Kakhovka technogenic catastrophe. The aquatorium contains a heterogeneous mix of anchored naval mines, drifting riverine mines, and UXO. Without technological intervention, natural seabed clearance would take an estimated 20–30 years.

2. Inadequacy of traditional methods. Standard NATO-style protocols are unsuitable economically – Ukraine's budget cannot sustain the CAPEX/OPEX of a conventional fleet covering 25,000 km² – and ecologically, since high-order detonations generate lethal zones up to 450 m and PTS zones up to 1.8 km, threatening the Black Sea harbor porpoise with local extinction.

3. Viability of the Green Demining strategy. The proposed three-stage strategy (Remote Monitoring – Robotic Identification – Green Neutralization) reduces the physical search area by ~60% via GIS drift modelling, eliminates acoustic trauma in biodiversity hotspots through mandatory deflagration, and has been validated by operational simulation.

Table 1

Comparative costs of mine detection per 1 sq. km (estimated)

Parameter	Traditional Mine-Sweeper (NATO-class)	Robotic AUV Swarm (Domestic)
Capital Cost (CAPEX)	> $50 million (per vessel)	< $0.5 million (per 10 drones)
Daily OPEX	> $20,000 (crew of 30+, logistics)	< $500 (operators, electricity)
Mobilization Time	Hours / Days	Minutes
Ecological Footprint	Significant (noise, CO_2, disturbance)	Minimal (silent electric motors)
Detection Probability	High	High (redundant sensors)

Table 2

SWOT Analysis of the "Green Demining" Strategy

STRENGTHS (Internal)	**WEAKNESSES (Internal)**
1. Zero mortality risk for marine mammals. 2. ~5% cost of traditional naval demining. 3. Scalable swarm architecture. 4. Complete personnel removal from danger zone.	1. Limited to Sea State 3 (waves <1.25 m). 2. Battery life of 4–6 hours requires frequent recharging. 3. High sonar data volume requires post-processing.
OPPORTUNITIES (External)	**THREATS (External)**
1. High eligibility for EU/UN environmental grants. 2. Dual-use for pipeline and cable inspection. 3. Export potential for low-cost demining drones.	1. Enemy electronic warfare targeting drones. 2. Re-mining risk in cleared areas. 3. Post-flood debris may damage fragile thrusters.

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

4. Economic and technological independence. Comparative analysis confirms that domestic Ukrainian AUV platforms reduce capital expenditure by orders of magnitude versus imported systems and achieve an estimated 40:1 operational cost advantage, fostering the national defense-tech sector.

5. Strategic funding access. The "Green Demining" concept enables Ukraine to reframe demining as an international environmental mission, unlocking EU Life, Green Climate Fund, and UNEP grants unavailable for purely military budgets – the only economically viable path to post-war Black Sea recovery.

6. The engineering drawing and CAD-modelling component is essential for the practical implementation of the proposed green demining strategy, as it ensures the standardization, modularity, maintainability and local manufacturability of domestic AUV/ROV platforms.

Prospects for the use of research results. Implementation of the proposed strategy creates a replicable model for conflict-zone humanitarian demining globally. The domestic AUV platforms developed for Black Sea conditions can be adapted for riverine clearance in Ukraine and exported to other nations facing post-conflict mine contamination. The GIS drift-modelling methodology can be incorporated into standard NATO and UN mine-action protocols for coastal operations in turbid-water environments.

References

1. Ustymenko V., Rohozian Y., Trehub O., Liashenko P., Zablodska D. *Economic and legal dimension of humanitarian demining of Ukraine*. Amazonia Investiga. – 2023. – Vol. 12, No. 65. – P. 287–295. DOI: 10.34069/AI/2023.65.05.27
2. Kostyria O., Ivanova A. International legal protection of the marine environment from pollution from ships on the example of the Black Sea. Lex Portus. 2020. No. 1. P. 37–50. DOI: https://doi.org/10.26886/2524-101x.1.2020.3
3. Грицаєнко М. Г. Управління проектами гуманітарного розмінування акваторій України: завдання формування організаційних структур. Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування. 2017. № 3 (470). С. 87–99. URL: https://eir.nuos.edu.ua/items/d568293e-e2e6-46b2-a847-b241bdada2a2?utm_source=chatgpt.com
4. Беспалко Р., Гуцул Т., Казімір І., Мирончук К. *Сучасні підходи до оцінювання черговості гуманітарного розмінування територій.* Technical Sciences and Technologies. – 2023. – No. 1 (31). – P. 146–157. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-1(31)-146-157
5. Тучковенко. Ю., Степаненко С. Вплив руйнування греблі каховської гес на екологічний стан одеського району чорного моряп. Проблеми водопостачання, каналізації та гідравліки. 2023. No. 44. P. 71–80. DOI: https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.44.71-80
6. О.Г. Лебідь та ін. Геоінформаційні технології екологічного моніторингу акваторії чорного моря після руйнування каховської *ГЕС*. Екологічна безпека та природокористування. – 2023. – No. 4. – P. 130–144. DOI: 10.32347/2411-4049.2023.4.130-144
7. Карпюк З. К. Загострення екологічної ситуації в Чорному та Азовському морях внаслідок бойових дій – довготривалі наслідки. Наука, освіта, технології та суспільство: проблеми та перспективи: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. 2024. URL: https://evnuir.vnu.edu.ua/bitstream/123456789/24795/1/conf_oct24.pdf
8. Соловйов І. І., Стрілець В. М. Екологічні аспекти підводного розмінування. Праці Національного університету цивільного захисту України. 2022. P. 39–42. URL: https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/zbirnik-nuczu/2022/Proceedings_NUCZU_2022.pdf
9. Hassan M. I., Ahmat D., Ouya S. Technologies behind the humanitarian demining: a review. SmartNets 2024: Proceedings of the International Conference. 2024. P. 1–7. URL: https://ieeexplore.ieee.org
10. Чеснаков Б.О. 3D-моделювання роботизованої платформи для гуманітарного розмінування. Харківський національний університет радіоелектроніки, 2024. URL: https://openarchive.nure.ua/handle/document/25977
11. Вирвихвіст О. В. Розробка апаратного модуля для пошуку вибухонебезпечних об'єктів. Харків: Харківський національний університет радіоелектроніки, 2024. URL: https://openarchive.nure.ua/handle/document/25918.
12. Boşneagu R. The mines war in the Black Sea: an unfinished conflict. Romanian Military Thinking. 2024. No. 4. P. 304–317. DOI: https://doi.org/10.55535/RMT.2024.4.20.
13. Akhundov A. *From phalanx to drone: historical transformations in the conduct of warfare and their societal implications.* Collection of Scientific Papers «SCIENTIA». – 2025. – P. 132–140. DOI: 10.36074/scientia-12.09.2025

Дата першого надходження статті до видання: 30.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

UDC 338.45:620.9:502.131.1(430)
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.30

INDUSTRIAL ENERGY TRANSFORMATION AND MULTI-LEVEL GOVERNANCE: EVIDENCE FROM GERMANY

Bilokon A.O.[1], **Aleksieieva A.O.**[2]
[1]GCIP Regional Acceleration Center for Innovation, Technology, and Start-Ups in Mykolaiv Region of Ukraine
[2]Petro Mohyla Black Sea National University
68 Desantnykiv str., 10, 54003, Mykolaiv
alona.bilokon@gmail.com, anna.aleksyeyeva@chmnu.edu.ua

This paper investigates the energy sector transformation in the German federal state of North Rhine-Westphalia as a process of systemic industrial restructuring within one of Europe's historically most carbon-intensive production regions. Drawing on an integrated analytical framework that combines legislative analysis with comparative empirical case studies, the study examines how climate-neutral transformation ambitions are operationalised in practice at the regional level. The analysis situates contemporary decarbonisation strategies within the long-term economic-historical pathway of the Ruhr industrial complex, characterised by strong path dependencies in fossil-fuel-based infrastructures, spatial industrial clustering, and high energy intensity. The findings demonstrate that energy transition in advanced manufacturing regions unfolds as a multidimensional reconfiguration of technological systems, infrastructure networks and governance arrangements, rather than as a linear substitution of energy carriers. The empirical analysis is based on six industrial transition case studies – Thyssenkrupp Steel tkH₂Steel, Carbon2Chem, STEAG / Iqony HydrOxy Hub Walsum, HyCologne regional hydrogen initiative, LyondellBasell MoReTec, and the Dortmund district heating modernisation – complemented by one municipal modernisation example, namely the renewable electricity procurement and public building decarbonisation strategy of the City of Cologne; together, these cases demonstrate how industrial hydrogen projects, carbon-utilisation initiatives, circular-economy investments, urban heat-system transformation, and public-sector renewable procurement constitute diverse yet interrelated transition pathways addressing heterogeneous emission sources within a regional industrial economy. Industrial process transformation emerges as a central driver of decarbonisation dynamics, yet its feasibility is shown to depend critically on the parallel development of low-carbon energy infrastructures and coordinated regional planning mechanisms. A key contribution of the article lies in highlighting the decisive role of multi-level governance in shaping regional transition trajectories. Federal climate legislation establishes binding regulatory frameworks and market incentives, but their practical implementation is mediated through state-level strategic coordination and municipal investment capacities. North Rhine-Westphalia thus functions as an analytically revealing case in which the effectiveness of vertically integrated climate governance can be assessed under conditions of strong industrial path dependency. Thus, the study contributes to contemporary debates on climate-neutral industrial transformation by demonstrating that decarbonisation in legacy manufacturing regions requires the synchronisation of technological innovation and institutional adaptation as well as socio-economic restructuring. The regional experience analysed here suggests that the long-term success of European energy transition strategies will depend on the capacity to reconcile ambitious emission-reduction targets with industrial competitiveness and labour-market stability. In this sense, North Rhine-Westphalia represents not merely a regional case but a strategic test environment for the future of climate-neutral industrial modernisation in advanced economies. *Key words:* industrial decarbonization, energy transition, climate governance, hydrogen infrastructure, regional energy policy, socio-technical transitions, North Rhine-Westphalia, Germany

Промислова енергетична трансформація та багаторівневе врядування: досвід Німеччини. Білоконь А.О., Алексєєва А.О.

У статті досліджено трансформацію енергетичного сектору німецької федеральної землі Північний Рейн-Вестфалія як процес системної індустріальної реструктуризації в одному з найбільш індустріальних регіонів Європи, де історично підприємства зосереджені на переробці вуглецевої сировини. Спираючись на теоретичну основу, що поєднує законодавчий аналіз і емпіричні кейси, у статті проаналізовано, яким чином на регіональному рівні відбувається перехід до кліматичної нейтральності. Розглянуто сучасні стратегії декарбонізації в довгостроковій економіко-історичній перспективі розвитку індустріального комплексу Рурського регіону, що характеризується розвинутою викопно-паливною інфраструктурою, кластеризацією промисловості та високою енергоємністю.

Отримані результати свідчать, що енергетичний перехід у розвинених індустріальних регіонах відбувається не як лінійна заміна енергоносіїв, а як багатовимірна реконфігурація технологічних систем, інфраструктурних мереж, а також механізмів управління. Емпіричну основу становлять шість кейсів індустріальної трансформації – Thyssenkrupp Steel tkH₂Steel, Carbon2Chem, STEAG / Iqony HydrOxy Hub Walsum, регіональна воднева ініціатива HyCologne, LyondellBasell MoReTec та модернізація систем централізованого теплопостачання у м. Дортмунд – доповнені муніципальним прикладом модернізації, а саме стратегією закупівлі відновлюваної електроенергії та декарбонізації громадських будівель міста Кельн. У сукупності

© Bilokon A.O., Aleksieieva A.O., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

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

ці кейси демонструють, як індустріальні водневі проєкти, ініціативи утилізації вуглецю, інвестиції у циркулярну економіку, трансформація міських теплових систем і публічні закупівлі відновлюваної енергії формують різноманітні, але взаємопов'язані напрямки переходу, спрямовані на різнорідні джерела викидів у межах регіональної промислової економіки.

Трансформація промислових процесів постає ключовим рушієм динаміки декарбонізації, однак її здійсненність критично залежить від паралельного розвитку низьковуглецевої енергетичної інфраструктури та скоординованих механізмів регіонального планування. Важливий внесок статті полягає у висвітленні визначальної ролі багаторівневого врядування у формуванні регіональних напрямків переходу. Федеральне кліматичне законодавство встановлює обов'язкові регуляторні рамки та ринкові стимули, проте їх практична імплементація опосередковується стратегічною координацією на рівні федеральних земель і інвестиційними спроможностями муніципалітетів. У цьому сенсі Північний Рейн-Вестфалія виступає аналітично показовим кейсом, що дозволяє оцінити ефективність вертикально інтегрованого кліматичного врядування в умовах сильної індустріальної залежності від попереднього розвитку.

Дослідження робить внесок у сучасні наукові дискусії щодо кліматично нейтральної індустріальної трансформації, демонструючи, що декарбонізація у регіонах зі «спадковою» промисловою структурою потребує синхронізації технологічних інновацій, інституційної адаптації та соціально-економічної реструктуризації. Проаналізований регіональний досвід свідчить, що довгостроковий успіх європейських стратегій енергетичного переходу залежатиме від здатності поєднати амбітні цілі скорочення викидів із забезпеченням промислової конкурентоспроможності, інфраструктурної стійкості та стабільності ринку праці. У цьому контексті Північний Рейн-Вестфалія постає не лише як регіональний приклад, а як стратегічне «тестове середовище» для майбутнього кліматично нейтральної індустріальної модернізації в розвинених економіках. *Ключові слова:* індустріальна декарбонізація, енергетичний перехід, адаптація до зміни клімату, воднева інфраструктура, регіональна енергетична політика, соціотехнічні трансформації, Північний Рейн-Вестфалія, Німеччина.

Introduction and historical background. North Rhine-Westphalia (NRW) represents the historical core of Germany's fossil-fuel-based industrialisation and continues to constitute one of the most analytically significant regions for examining the structural dynamics of energy transformation in advanced industrial economies. From the late nineteenth century onwards, the Ruhr area evolved into a major integrated coal-and-steel production complex. The geographical concentration of hard-coal resources, the expansion of inland waterway transport along the Rhine and Ruhr rivers, and the rapid development of railway infrastructure enabled the formation of dense, vertically integrated industrial clusters linking mining, metallurgy, heavy engineering, and thermal power generation. This historically embedded industrialization generated persistently high levels of energy intensity and created long-term capital lock-ins in carbon-based infrastructures that continue to shape contemporary development pathways.

Despite several decades of structural adjustment, North Rhine-Westphalia retains a macroeconomically dominant position within the German federal system in terms of both demographic weight [1] and economic output [2]. The regional economy remains strongly influenced by the presence of large-scale manufacturing activities and energy-intensive basic industries. Industrial production therefore continues to play a structurally significant role in regional value creation, reflecting the enduring importance of sectors such as steelmaking, chemicals, machinery production, and associated supply chains.

Energy consumption patterns further illustrate the industrial character of the region. The concentration of process-heat-intensive industries contributes to comparatively high levels of industrial energy demand and reinforces the systemic interdependence between production technologies, infrastructure networks, and regional energy systems. Labour-market structures likewise demonstrate the continued socio-economic relevance of manufacturing, as industrial employment remains an important pillar of regional economic stability and social cohesion.

The long transition from coal-based industrial expansion to a lower-carbon economic structure has therefore not resulted in a fully post-industrial economy but rather in a hybrid industrial system combining advanced manufacturing capabilities with persistent fossil-fuel dependencies. The formal end of hard-coal mining in Germany marked a symbolic turning point in this transformation process; however, the continued operation of carbon-intensive production routes and fossil-based power generation illustrates the structural inertia of legacy energy systems.

From an economic-historical and socio-technical perspective, North Rhine-Westphalia thus represents a paradigmatic case of path-dependent industrial decarbonisation. Long-term capital investments in fossil infrastructures have led to institutional, technological, and labour-market lock-ins that constrain the pace and direction of transformation. Simultaneously, dense industrial clustering, advanced research capacities, and highly developed logistics networks create favourable conditions for innovation-driven restructuring. The energy transition in NRW must therefore be understood as a process of systemic industrial reconfiguration rather than a linear substitution of energy carriers.

In analytical terms, developments in this region extend far beyond the German national context. The capacity of North Rhine-Westphalia to reconcile ambitious climate mitigation targets with the preservation of industrial competitiveness and employment stability will constitute a decisive test case for the broader feasibility of climate-neutral transformation strategies in Europe's traditional manufacturing heartlands.

State of the Art. Recent scholarship has increasingly emphasised that industrial decarbonisation constitutes one of the most complex dimensions of contemporary energy transition processes, requiring the simultaneous

transformation of technological systems, market structures, and governance frameworks. New research (Kim, 2024) highlights that achieving climate neutrality in energy-intensive sectors depends not only on fuel switching and electrification but also on systemic innovation across energy, material, and resource-efficiency strategies [3]. Such perspectives move beyond earlier technology-centric approaches by conceptualising industrial transition as a socio-technical restructuring process embedded in specific regional economic contexts. At the same time, the governance literature (Lockwood et al., 2025) has shifted towards analysing policy-mix dynamics and institutional coordination challenges associated with industrial decarbonisation pathways. Recent empirical studies demonstrate that fragmented regulatory frameworks and sequencing problems in climate policy instruments can significantly affect the implementation of decarbonisation investments, particularly in advanced industrial economies [4]. These findings underscore the importance of analysing transition processes through a multi-level governance lens that considers both top-down regulatory coherence and bottom-up regional implementation capacity. Another emerging research strand focuses on spatial and regional dimensions of industrial transition. Contemporary studies (Norris, 2024) emphasise that decarbonisation trajectories are strongly shaped by place-based socio-economic conditions, including industrial heritage, labour-market dependencies, and regional innovation ecosystems [5]. This territorial perspective has gained further prominence as scholars increasingly investigate the role of industrial clusters and dispersed production sites in shaping decarbonisation feasibility and policy design (Rattle, 2024) [6]. More broadly, interdisciplinary research highlights the need to integrate energy-system modelling with industrial transition analysis in order to understand the mutual impacts of electrification and hydrogen deployment as well as infrastructure investment planning. Recent modelling studies (Raillard-Cazanove et al., 2024) indicate that industrial decarbonisation is likely to generate substantial increases in electricity and hydrogen demand, thereby reshaping regional energy markets and investment priorities [7]. These insights reinforce the argument that industrial transformation should be analysed as a systemic process involving technological substitution, infrastructural expansion, and institutional adaptation.

Research Gap. Despite this growing body of scholarship, significant research gaps remain. First, much of the existing literature addresses energy transition either at the macro-policy level or through sector-specific technological studies, while comparatively fewer contributions provide integrated analyses that combine legislative frameworks with detailed empirical investigation of industrial transformation projects. Second, while hydrogen-based decarbonisation and circular-economy innovations have received increasing attention in conceptual debates, there is still limited regionally grounded research examining how these pathways are implemented in historically carbon-intensive industrial territories. Third, the interaction between industrial decarbonisation initiatives and municipal energy governance structures remains insufficiently explored, particularly in large metropolitan manufacturing regions characterised by dense infrastructural interdependencies.

This paper seeks to address these gaps by developing a combined institutional-empirical analytical framework applied to North Rhine-Westphalia, one of Germany's largest industrial federal states. By examining both the legislative architecture of energy transition and a set of strategically selected industrial and urban case studies, the study contributes to a more differentiated understanding of how climate neutrality objectives are operationalised within complex regional production systems. In doing so, it provides new insights into the governance and socio-economic dynamics shaping the feasibility of climate-neutral industrial transformation in advanced economies.

Methodology. This article adopts a qualitative multi-level analytical design in order to examine how energy transition processes are operationalised within a historically carbon-intensive industrial region. The research combines institutional policy analysis with empirically grounded case-study investigation, thereby allowing for the assessment of both regulatory frameworks and their practical implementation in technological and investment decisions. Such an approach is particularly appropriate for the study of energy transition in North Rhine-Westphalia, where structural transformation unfolds through the interaction of federal climate policy and municipal energy governance.

Methodologically, the study proceeds through two complementary steps. First, it undertakes a systematic examination of legislative and policy frameworks at federal, state, and municipal levels. This institutional analysis serves to identify the regulatory incentives, planning instruments, and governance mechanisms that shape the strategic environment for decarbonisation. By analysing binding targets, market-support mechanisms, infrastructure planning obligations, and sector-specific regulatory measures, the study situates regional transformation processes within the broader architecture of Germany's multi-level energy governance system. The legislative context is therefore treated not as descriptive background, but as an analytical dimension that conditions technological trajectories and investment feasibility.

Second, the research employs a comparative qualitative case-study approach in order to explore how these institutional frameworks are translated into concrete transition practices. Case selection followed four criteria: (1) demonstrable technological or policy innovation relevant to decarbonisation, (2) availability of reliable public documentation from industrial, governmental, or research sources, (3) geographical location within North Rhine-Westphalia, and (4) potential analytical transferability to other industrial regions undergoing energy tran-

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

sition. On this basis, six principal cases were selected representing key transition domains, including industrial process transformation, hydrogen infrastructure development, circular-economy innovation, urban heat-system restructuring, and municipal energy procurement strategies.

Each case is analysed as a self-contained empirical unit to ensure methodological transparency and facilitate cross-case comparison. The analytical framework applied to all cases includes examination of technological configuration, stakeholder constellations, financing structures, measurable performance indicators, implementation timelines, and risk factors. Particular attention is given to the interaction between industrial investment strategies and regulatory conditions at different governance levels. This structured comparative design enables the identification of recurring patterns and systemic constraints shaping regional decarbonisation trajectories.

The qualitative design prioritises analytical depth and contextual interpretation over statistical generalisation. The selected cases therefore illustrate structurally significant transition pathways rather than providing an exhaustive representation of all decarbonisation initiatives in the region. Moreover, many projects analysed remain in development or early operational phases, meaning that technological performance, cost structures, and emission-reduction impacts may evolve over time. The findings should consequently be understood as a process-oriented assessment of industrial transformation dynamics within a multi-level governance framework.

On this methodological basis, the analysis proceeds first to the examination of the legislative and policy context structuring the institutional environment of the energy transition in North Rhine-Westphalia, and subsequently to the empirical investigation of selected transition projects that demonstrate how regulatory frameworks are translated into practical implementation pathways.

Theoretical and analytical contributions. Building on the identified research gaps, this article makes the following contributions to the literature on industrial energy transformation:

− Conceptualises energy transformation in legacy industrial regions as a process of systemic production restructuring, rather than as a linear substitution of energy technologies, thereby integrating perspectives from socio-technical transition theory and regional political economy.

− Demonstrates empirically how multi-level climate governance frameworks shape industrial decarbonisation pathways, showing that regulatory targets and market instruments are mediated through regionally specific institutional capacities and infrastructural constraints.

− Develops a comparative analytical framework that links legislative policy analysis with project-level empirical evidence, contributing methodological insight into how technological transformation processes can be studied across governance scales.

− Provides new regionally grounded evidence on the interaction between hydrogen innovation, circular material strategies, urban energy systems, and public-sector demand formation, thereby advancing understanding of diversified transition pathways in advanced manufacturing economies.

Legislative and Policy Context

The energy sector transformation in North Rhine-Westphalia unfolds within a dense and multi-layered regulatory environment shaped by federal climate legislation, state-level strategic planning, and municipal implementation instruments. Understanding this institutional configuration is essential for interpreting regional decarbonisation dynamics, as investment decisions in industrial transformation, energy infrastructure, and urban energy systems are strongly conditioned by binding emission targets, market-support mechanisms, and spatial planning obligations. This chapter therefore examines the key legislative frameworks and policy strategies that define the operational parameters of the transition process. By analysing how federal regulatory instruments interact with state-level implementation strategies and local governance practices, the section establishes the institutional context within which the subsequent empirical case studies are situated.

Federal level: binding regulatory frameworks. The institutional architecture of Germany's energy transition is primarily defined at the federal level through a set of interrelated statutory instruments that establish binding targets, market incentives, and planning obligations. These laws collectively structure investment conditions and determine the regulatory environment within which regional and local transition processes unfold.

A central pillar of the regulatory framework is the Renewable Energy Sources Act (Erneuerbare-Energien-Gesetz, EEG), which governs the expansion of renewable electricity generation through auction systems, grid priority rules, and long-term remuneration mechanisms. Amendments adopted in 2023 significantly strengthened expansion targets for wind and solar energy as part of Germany's strategy to achieve climate neutrality [8]. The Energy Industry Act (Energiewirtschaftsgesetz, EnWG) provides the legal framework for the operation and regulation of electricity and gas networks, including provisions for grid access, infrastructure planning, and market integration of new energy carriers such as hydrogen. Recent legislative reforms have aimed at accelerating grid expansion and facilitating system integration of renewable energy sources [9]. Climate governance is further anchored in the Federal Climate Change Act (Bundes-Klimaschutzgesetz, KSG), which establishes legally binding national greenhouse-gas reduction targets and sectoral emission budgets. The reform adopted in 2024 strengthened long-term climate neutrality targets and adjusted governance mechanisms for monitoring sectoral compliance [10]. In the buildings sector, the Building Energy Act (Gebäudeenergiegesetz,

GEG) sets minimum efficiency standards and defines requirements for the gradual integration of renewable heating technologies in new installations and system replacements. The law constitutes a key regulatory instrument for reducing emissions in the residential and public building stock [11]. A major recent addition to the regulatory landscape is the Heat Planning Act (Wärmeplanungsgesetz, WPG) adopted in 2023. This legislation introduces mandatory municipal heat planning obligations, requiring local authorities to assess future heat demand structures and designate preferred supply solutions such as district heating networks or decentralised heat pump systems. By establishing statutory deadlines and planning responsibilities, the law directly influences local investment strategies in heat infrastructure [12]. Complementing these measures, the Combined Heat and Power Act (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz, KWKG) provides targeted financial support for high-efficiency cogeneration installations. CHP technologies are considered an important transitional instrument for improving energy efficiency and reducing emissions in both industrial and urban heat supply systems [13]. Finally, federal spatial planning instruments for renewable deployment have been strengthened through the Wind Energy Area Requirements Act (Windenergie flächenbedarfsgesetz, WindBG). This legislation obliges federal states to allocate legally defined land shares for onshore wind energy development, thereby accelerating permitting procedures and reducing planning uncertainty [14]. Taken together, these federal laws establish a comprehensive regulatory envelope that combines climate targets, market-based support mechanisms, infrastructure planning rules, and sector-specific obligations.

State level: policy adaptation and strategic coordination in North Rhine-Westphalia. Within this federal framework, the Länder play a crucial role in translating national objectives into regionally adapted implementation strategies. North Rhine-Westphalia has articulated its policy approach in the Energy and Heat Strategy NRW (Energie- und Wärmestrategie Nordrhein-Westfalen, 2024), which defines sectoral priorities including renewable expansion, hydrogen deployment, industrial decarbonisation, and district heating modernisation [15]. In addition, the state has introduced legislative initiatives aimed at strengthening social acceptance of renewable infrastructure. The NRW Citizen Energy Act (Bürgerenergiegesetz NRW) seeks to promote financial participation of local communities in wind energy projects, thereby addressing distributional conflicts frequently associated with spatial planning for renewable generation [16]. Parallel strategic initiatives include the development of a regional hydrogen roadmap and import strategy designed to secure long-term supply for energy-intensive industries. These policy instruments reflect the specific structural conditions of NRW as Germany's largest industrial state and aim to align decarbonisation pathways with regional economic resilience objectives.

Municipal level: implementation and investment decisions. At the municipal scale, energy transition policies become operational through spatial planning, procurement strategies, and infrastructure investment decisions. Under the federal Heat Planning Act, municipalities are now legally required to prepare binding local heat plans (Kommunale Wärmeplanung) that define future heat supply pathways and guide public and private investment [17]. In practice, many cities complement statutory planning obligations with broader climate action programmes, including the procurement of renewable electricity for public buildings, the expansion of district heating networks, and incentives for rooftop photovoltaic deployment. These local instruments play a decisive role in translating regulatory frameworks into concrete decarbonisation outcomes.

Findings

The interaction between federal legislation, state-level strategic coordination, and municipal implementation produces a governance system that is legally coherent yet institutionally complex. Successful energy transition projects depend on effective vertical policy alignment, clearly defined financing responsibilities, and sufficient administrative capacity at the local level.

The institutional configuration of the German energy transformation becomes particularly visible in North Rhine-Westphalia because the region concentrates structural conditions that require intensive coordination across governance levels. As Germany's largest industrial Land and a major centre of energy-intensive production, NRW is simultaneously subject to binding federal climate targets, dependent on state-level strategic steering, and reliant on municipal implementation capacities for the practical realisation of infrastructure projects. Federal legislation defines the regulatory envelope through sectoral emission budgets, renewable expansion frameworks, and planning obligations, yet the spatial and economic implications of these rules are negotiated and operationalised at the regional and local scale. In NRW, where industrial decarbonisation, grid expansion, hydrogen deployment, and heat transformation intersect within densely populated metropolitan areas, policy implementation inevitably involves vertical integration of competencies and financial instruments.

This multi-level governance dynamic is further intensified by the region's historical path dependency. The legacy of coal-based industrialisation has produced entrenched infrastructures and socio-economic interests that cannot be transformed solely through national policy directives. Instead, transition processes depend on coordinated action between federal ministries, state governments, municipal utilities, industrial actors, and financial institutions. North Rhine-Westphalia therefore functions as a particularly revealing empirical setting in which the effectiveness of Germany's layered governance architecture can be assessed. The region illustrates how energy transition in advanced industrial economies unfolds as a negotiated restructuring of

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

territorial production systems rather than as a purely technocratic policy exercise.

The examined legislative instruments and policy strategies reveal that the energy transition in North Rhine-Westphalia is embedded in a vertically integrated governance framework that combines binding federal climate targets with regionally differentiated implementation pathways. While national regulations establish long-term decarbonisation objectives and market incentives, their practical realisation depends on state-level strategic coordination and municipal planning capacities. This multi-level institutional configuration creates both opportunities and constraints for industrial and urban transformation processes. In order to assess how these regulatory conditions shape concrete technological choices, investment dynamics, and infrastructural developments, the analysis now turns to a set of empirically grounded case studies from key sectors of the regional economy.

Empirical Case Studies of Industrial and Urban Energy Transformation in North Rhine-Westphalia

The following part presents a series of empirically grounded case studies that illustrate how energy transition policies are operationalised within the industrial and urban context of North Rhine-Westphalia. Each case is structured as a self-contained analytical subsection in order to ensure methodological transparency and facilitate cross-case comparison. The analysis begins with a concise summary of the project's strategic relevance, followed by a systematic examination of its technological configuration, stakeholder constellation, financing arrangements, measurable performance indicators, and implementation trajectory. Particular attention is given to publicly available quantitative evidence on capacity development, emission-reduction potential, and investment scale. The subsections further assess key risk factors and mitigation strategies before concluding with short reflections on policy relevance and the potential transferability of the observed transition pathway to other industrial regions.

Case 1. Thyssenkrupp Steel: tkH_2Steel (Hydrogen-based Direct Reduction Transformation, Duisburg). The tkH_2Steel programme represents one of Europe's most advanced large-scale industrial decarbonisation initiatives, aiming to replace carbon-intensive blast-furnace steel production with hydrogen-based direct-reduction technology integrated with renewable electricity supply chains [18].

A. Context and technical description. Thyssenkrupp Steel Europe is pursuing a phased transformation of its Duisburg production complex centred on the gradual substitution of blast-furnace routes with hydrogen-based direct-reduction (DR) processes. The technological concept involves the production of direct-reduced iron (DRI) using hydrogen as a reducing agent, followed by melting in electrically powered furnaces. This approach is intended to substantially reduce process-related carbon emissions inherent in conventional coke-based steelmaking.

The transformation programme combines three interdependent components. First, the construction of pilot and subsequently commercial-scale direct-reduction plants constitutes the technological core of the transition. Second, the company has initiated procurement procedures for large volumes of low-carbon hydrogen, including a public tender seeking supply contracts of up to approximately 151,000 tonnes annually. Third, the electrification of production processes requires long-term access to renewable electricity, secured in part through power-purchase agreements. In this context, Thyssenkrupp concluded a ten-year electricity supply agreement with RWE covering approximately 112 GWh per year for the first DR installation [19].

B. Stakeholder constellation. The project is led by Thyssenkrupp Steel Europe as owner-operator and strategic investor. Hydrogen supply is expected to be provided through a combination of industrial electrolysis projects in the region and third-party producers participating in long-term supply tenders. Renewable electricity suppliers, notably RWE in the initial phase, constitute a further critical stakeholder group through contractual power-purchase arrangements.

Public authorities at federal and state levels play an enabling role through subsidy programmes, regulatory approvals, and infrastructure planning support. Hydrogen network development initiatives, including regional coordination platforms such as HyCologne, contribute to long-term system integration [20]. Local municipalities and labour representatives are also directly involved, given the project's implications for regional employment structures and urban industrial development trajectories.

C. Financing structure and business model. Financing structure and business model. Public information indicates that the transformation is supported by substantial state aid. There are some challenges German industry faces in meeting emissions targets while staying competitive in a sector that suffers from high energy costs and cheaper products from Asian rivals. Media reporting suggests that federal support commitments may reach several billion euros, although detailed capital structures and financing mixes remain undisclosed [21].

From a commercial perspective, the business model combines long-term electricity procurement contracts, hydrogen supply agreements, and anticipated carbon-cost savings associated with EU emissions trading. However, the company has publicly emphasised that economic viability remains contingent on the availability of competitively priced hydrogen, indicating residual financing risk and the continued relevance of public risk-sharing mechanisms.

D. Measurable outputs and performance indicators. Publicly available project documentation provides several indicative quantitative benchmarks. As of 2024, requirement for 143,000 metric tons of hydrogen is to

be covered, signalling the scale of demand [19]. The renewable electricity supply agreement for the first DR facility corresponds to roughly 112 GWh annually. In terms of emissions performance, company statements and independent assessments suggest that full operation with renewable hydrogen could significantly reduce direct process emissions compared with conventional blast-furnace production [22]. Precise lifecycle emission reductions will ultimately depend on the carbon intensity of hydrogen supply and electricity sourcing.

E. Permitting trajectory and implementation milestones. The hydrogen procurement process entered the public tender phase in early 2024. Parallel planning steps include contractual arrangements for electricity supply and the preparation of investment decisions for pilot direct-reduction units. Project timelines remain dependent on regulatory approvals, grid connection procedures, and confirmation of hydrogen supply contracts. Industrial decarbonisation projects of this scale typically involve multi-year permitting processes linked to environmental impact assessments and infrastructure integration requirements.

F. Risk factors and mitigation strategies. The most significant structural risk concerns hydrogen availability and price volatility. Public statements by company leadership indicate that sustained high hydrogen costs could undermine investment feasibility. Mitigation strategies include long-term offtake contracts, participation in European funding programmes such as Important Projects of Common European Interest (IPCEI), and potential regulatory support for electrolysis electricity pricing.

Additional risks relate to delays in hydrogen pipeline deployment and electricity grid expansion. Regional coordination initiatives and phased investment strategies are intended to reduce infrastructure timing mismatches. Social acceptance risks are addressed through engagement with municipal stakeholders and labour representatives, given the project's importance for employment continuity in the Ruhr industrial cluster.

G. Policy relevance and transferability. The tkH₂Steel programme demonstrates that large-scale industrial decarbonisation requires synchronised development of production technologies, renewable electricity supply, hydrogen infrastructure, and public financing instruments. The case illustrates both the opportunities and systemic vulnerabilities associated with first-mover investments in hydrogen-based industrial transformation. For policymakers, the project underscores the importance of coordinated infrastructure planning, stable regulatory frameworks, and targeted subsidy mechanisms to support early industrial adopters while avoiding long-term stranded-asset risks.

Case 2. Carbon2Chem: Industrial Carbon Capture and Utilisation in Integrated Steel Production (Duisburg Region). Carbon2Chem represents one of Europe's most advanced research-to-demonstration programmes exploring the conversion of metallurgical process gases into chemical feedstocks, thereby linking industrial decarbonisation strategies with circular carbon utilisation pathways [23].

A. Context and technical description. The Carbon2Chem initiative was launched as a multi-actor innovation programme aimed at reducing industrial greenhouse-gas emissions through the utilisation of process gases generated in steel production. Integrated steelmaking releases significant volumes of carbon-rich off-gases containing carbon monoxide, carbon dioxide, and hydrogen. Traditionally, these gases are combusted for internal energy recovery. Carbon2Chem explores an alternative technological pathway in which such streams are captured, purified, and converted into chemical intermediates such as methanol or ammonia.

The technological concept combines gas cleaning, catalytic synthesis, and the integration of renewable hydrogen into chemical conversion processes. By transforming emissions into industrial feedstocks, the project seeks to establish circular material loops linking the steel and chemical industries. The programme has evolved through several phases, progressing from laboratory experimentation to pilot-scale demonstration facilities and regional system-integration testing [24].

B. Stakeholder constellation. Carbon2Chem operates as a collaborative research and innovation network coordinated by Thyssenkrupp Steel and involving multiple industrial and scientific partners. Key participants include research institutions such as Fraunhofer UMSICHT and Forschungszentrum Jülich, which contribute expertise in catalysis, process engineering, and systems integration. Chemical industry actors participate as potential off-takers of synthetic feedstocks, while federal research funding bodies provide financial support for pilot development and experimental infrastructure. This multi-actor configuration reflects the systemic character of industrial decarbonisation challenges, which require cross-sectoral cooperation beyond single-firm investment strategies.

C. Financing structure and business model. Publicly available information indicates that the programme is financed through a combination of industrial co-funding and government research grants, particularly from German federal innovation funding schemes. Detailed capital expenditure figures for potential commercial-scale deployment are not publicly disclosed. The emerging business model centres on the valorisation of previously under-utilised industrial gas streams. By producing synthetic chemical feedstocks, the technology could create new revenue streams while simultaneously reducing compliance costs associated with carbon pricing mechanisms. However, commercial viability depends on several uncertain variables, including hydrogen input costs, product market prices, and future regulatory incentives for low-carbon materials.

D. Measurable outputs and performance indicators. Demonstration activities have resulted in pilot installations capable of producing limited quantities of

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

synthetic methanol from metallurgical gases, illustrating the technical feasibility of the conversion pathway. Published project materials indicate production at experimental scales ranging from laboratory outputs to small demonstration volumes, with ongoing research focused on scaling potential and process stability [24]. Quantified emission-reduction potentials depend on the extent to which captured gases replace fossil-based chemical feedstocks and on the carbon intensity of supplementary hydrogen supply. Consequently, lifecycle assessments remain project-specific and are still under development.

E. Permitting trajectory and implementation milestones. As a research-driven innovation programme, Carbon2Chem has progressed through staged development phases. Early phases focused on laboratory validation, followed by pilot-scale installations integrated into existing industrial sites. Current project phases concentrate on industrial demonstration and system optimisation. Full commercial deployment would require standard industrial permitting procedures for chemical synthesis facilities, including environmental impact assessments and integration into regional infrastructure systems.

F. Risk factors and mitigation strategies. Key technical risks relate to process scalability and the management of fluctuating gas compositions in metallurgical operations. Mitigation strategies include modular pilot deployment, advanced gas-conditioning technologies, and continuous process monitoring. Economic risks arise from uncertain demand for low-carbon chemical products and volatile hydrogen input costs. These uncertainties may be addressed through long-term offtake agreements, certification schemes for low-carbon materials, and targeted industrial policy support. Regulatory risks concern the evolving classification of carbon-capture-and-utilisation technologies within European climate policy frameworks. Clear standards for lifecycle accounting and product labelling are likely to be critical for large-scale market adoption.

G. Policy relevance and transferability. Carbon2Chem demonstrates the strategic importance of integrating carbon-management solutions into industrial decarbonisation portfolios. Unlike fuel-switching strategies alone, utilisation pathways offer the possibility of maintaining industrial value creation while reducing net emissions. The case illustrates how research-industry consortia can function as innovation incubators for systemic transition technologies. For policymakers, the project highlights the need for sustained public support for pilot infrastructures, cross-sectoral coordination mechanisms, and regulatory clarity regarding the climate benefits of carbon utilisation. The approach may be transferable to other industrial clusters characterised by concentrated emissions sources and proximity to chemical production networks.

Case 3. STEAG / Iqony HydrOxy Hub Walsum: Large-Scale Electrolysis Infrastructure for Industrial Hydrogen Supply (Duisburg-Walsum). The HydrOxy Hub Walsum project represents a strategic attempt to establish large-scale electrolysis capacity within an existing industrial brownfield site, thereby creating regional hydrogen supply infrastructure for energy-intensive industries in the Ruhr area [25].

A. Context and technical description. The planned electrolysis facility at the former Walsum power-generation site reflects a broader shift from fossil-fuel-based energy supply towards integrated hydrogen infrastructures tailored to industrial demand. The project concept envisages the installation of electrolysis units with a potential capacity of up to approximately 500 MW, enabling the production of renewable hydrogen for nearby industrial consumers, including steel and chemical facilities. Technically, the project combines water electrolysis technologies, high-voltage grid connections, hydrogen compression and storage systems, and potential pipeline interfaces linking production sites with industrial offtakers. The reuse of an existing industrial site with established energy infrastructure is intended to reduce permitting complexity and accelerate implementation timelines [26].

B. Stakeholder constellation. The initiative is jointly advanced by energy infrastructure developer Iqony (formerly STEAG Power GmbH) and industrial partners, including Thyssenkrupp Steel as a prospective anchor hydrogen consumer. Technology providers specialising in large-scale electrolysis systems are expected to supply core process components, while transmission system operators and regional network planners are involved in grid integration and potential hydrogen transport solutions. Public authorities at both federal and state levels participate through funding programmes and regulatory oversight, particularly in the context of European Important Projects of Common European Interest (IPCEI) frameworks for hydrogen infrastructure development [27].

C. Financing structure and business model. Publicly available information suggests that the project has sought recognition within European hydrogen funding schemes designed to reduce investment risk for first-of-a-kind infrastructure. While detailed capital expenditure estimates have not been formally disclosed, large-scale electrolysis installations of this magnitude typically involve substantial upfront investment in process equipment, grid connections, and auxiliary systems. The underlying business model is based on long-term hydrogen supply contracts with industrial customers combined with potential revenue streams linked to renewable energy market participation and carbon-pricing incentives. Financial viability therefore depends on stable regulatory frameworks governing hydrogen certification, electricity pricing for electrolysis, and infrastructure cost allocation.

D. Measurable outputs and performance indicators. The projected electrolysis capacity of up to 500 MW would place the Walsum facility among the largest

planned hydrogen production sites in Germany. Depending on operational load factors and technological efficiency, such capacity could enable annual hydrogen production in the range of several tens of thousands of tonnes. Precise emission-reduction impacts will depend on the extent to which the hydrogen produced substitutes fossil-based energy carriers in industrial processes and on the carbon intensity of electricity supply used for electrolysis. As the project remains in planning and early development stages, verified operational performance data are not yet available.

E. Permitting trajectory and implementation milestones. Initial feasibility studies and cooperation agreements were publicly announced in the early 2020s. Progression to construction phases is contingent upon successful funding approvals, grid-connection planning, environmental permitting procedures, and confirmation of long-term hydrogen demand commitments. Projects of comparable scale typically require multi-year planning horizons, reflecting the complexity of integrating new energy infrastructures into existing industrial systems.

F. Risk factors and mitigation strategies. A primary risk concerns the availability of competitively priced renewable electricity, which constitutes the dominant operational cost component of hydrogen production. Potential mitigation strategies include long-term power-purchase agreements and policy instruments aimed at reducing electricity levies for electrolysis. Infrastructure synchronisation risks are also significant. Delays in hydrogen transport network deployment could constrain the effective utilisation of production capacity. Regional coordination initiatives and phased capacity expansion strategies are therefore critical to reducing systemic bottlenecks. Regulatory uncertainty regarding hydrogen market design, certification standards, and state-aid frameworks represents an additional challenge for investment planning.

G. Policy relevance and transferability. The Walsum electrolysis hub illustrates the infrastructural dimension of industrial decarbonisation, demonstrating that technological transformation within production processes must be accompanied by parallel development of low-carbon energy supply systems. The project highlights the importance of spatial clustering between hydrogen production and industrial demand as a strategy for reducing transport costs and accelerating market formation. From a policy perspective, the case underscores the need for coordinated planning of electricity grids, hydrogen pipelines, and industrial investment incentives. Similar brownfield-based hydrogen hub concepts may be transferable to other legacy industrial regions seeking to combine decarbonisation objectives with economic restructuring.

Case 4. HyCologne: Regional Hydrogen Cluster and Infrastructure Coordination in the Rhineland. HyCologne represents a regional coordination platform designed to aggregate industrial hydrogen demand, facilitate infrastructure planning, and support the phased development of a metropolitan hydrogen economy in the Cologne–Rhineland industrial corridor [28].

A. Context and technical description. The HyCologne initiative (Wasserstoff Region Rheinland e.V.) was established as a multi-stakeholder association aiming to accelerate hydrogen deployment in one of Germany's most industrialised metropolitan regions. The project operates primarily at the level of strategic system integration rather than technological demonstration. Its core objective is to align hydrogen production projects, transport infrastructure planning, industrial demand aggregation, and municipal energy strategies within a coherent regional framework. Feasibility studies undertaken within the initiative, ncluding the Hydrogen Rhineland (H2R) concept, have mapped potential pipeline corridors, identified industrial demand centres, and proposed phased infrastructure expansion scenarios. These planning exercises are intended to reduce coordination failures that could otherwise arise from fragmented project development across administrative and corporate boundaries [28].

B. Stakeholder constellation. HyCologne functions as a network organisation bringing together industrial firms, municipal authorities, energy utilities, infrastructure operators, and research institutions. Member organisations include major industrial energy consumers, regional utilities, transport providers, and local governments seeking to integrate hydrogen solutions into climate action strategies. This governance structure reflects the recognition that hydrogen market formation requires collective action mechanisms beyond individual investment decisions. The initiative therefore acts as a platform for information exchange, joint project development, and coordinated funding applications within national and European support programmes.

C. Financing structure and business model. As a coordination and planning initiative, HyCologne does not itself operate hydrogen production assets. Instead, its activities are financed through a combination of membership contributions, public funding for regional development projects, and participation in feasibility studies supported by federal and EU innovation programmes. The underlying economic rationale is to reduce transaction costs for infrastructure deployment by creating predictable demand signals and shared planning frameworks. By aggregating industrial consumption forecasts and aligning project timelines, the initiative aims to enhance investment security for private developers of hydrogen production and transport infrastructure.

D. Measurable outputs and performance indicators. HyCologne's outputs are primarily strategic and organisational rather than technological. These include stakeholder network expansion, the development of regional hydrogen roadmaps, and the identification of priority infrastructure corridors. Public documentation indicates that the initiative has compiled a portfolio of numerous proposed hydrogen-related projects across

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

the Rhineland region, reflecting growing industrial engagement with hydrogen transition pathways [29]. Quantitative emission-reduction impacts depend on the implementation of individual infrastructure and industrial projects facilitated by the coordination platform.

E. Permitting trajectory and implementation milestones. Since its establishment, HyCologne has focused on preparatory activities including feasibility analyses, stakeholder consultations, and strategic concept development. The transition from planning to implementation is contingent upon funding approvals, regulatory clarity regarding hydrogen network operation, and investment decisions by participating firms. Infrastructure deployment timelines will therefore vary according to project-specific permitting procedures and market conditions.

F. Risk factors and mitigation strategies. A principal risk associated with regional hydrogen initiatives concerns coordination complexity. Divergent investment timelines among industrial actors and infrastructure developers may lead to mismatches between supply availability and demand uptake. HyCologne addresses this risk through continuous stakeholder engagement and the development of shared planning scenarios. Regulatory uncertainty regarding hydrogen transport regulation and market design also represents a constraint. Active engagement with federal policy processes and participation in funding consortia are intended to improve institutional predictability.

G. Policy relevance and transferability. HyCologne demonstrates the importance of governance innovation in energy transition processes. While technological solutions such as electrolysis or hydrogen-based production routes attract significant attention, their large-scale deployment depends equally on regional coordination mechanisms capable of aligning infrastructure development with industrial restructuring strategies. The initiative offers a transferable model for other metropolitan industrial regions seeking to organise hydrogen transition pathways through collaborative planning platforms. It highlights that decarbonisation in complex industrial territories is not solely a matter of technological substitution but also of institutional capacity-building and spatial governance integration.

Case 5. LyondellBasell MoReTec: Industrial-Scale Chemical Recycling and Circular Feedstock Integration (Wesseling). The MoReTec project represents one of the first industrial-scale advanced chemical recycling investments in Germany, aiming to convert mixed plastic waste into secondary petrochemical feedstocks and thereby reduce lifecycle emissions in polymer production [30].

A. Context and technical description. The Wesseling facility forms part of LyondellBasell's broader strategy to integrate circular-economy technologies into existing petrochemical value chains. The MoReTec process is based on catalytic pyrolysis techniques that thermochemically convert mixed plastic waste streams into hydrocarbon feedstocks suitable for further processing in steam crackers and polymer production units.

This technological pathway differs from mechanical recycling approaches by enabling the treatment of contaminated or heterogeneous waste fractions that are otherwise difficult to recycle. By reinserting recovered feedstock into primary production processes, the project seeks to reduce dependence on virgin fossil raw materials and contribute to emissions reductions along the lifecycle of plastic products. The plant is being constructed within an established chemical cluster, allowing direct integration into existing industrial infrastructure and logistics systems [31].

B. Stakeholder constellation. LyondellBasell acts as project developer, investor, and future operator of the facility. Local and regional authorities are involved through permitting procedures and site-development coordination. Waste-management companies constitute important upstream partners by supplying plastic feedstock streams, while downstream integration occurs within the company's own polymer production networks and potentially through external chemical industry customers. The project also reflects broader policy interactions with European circular-economy legislation and regulatory pressures concerning recycled content quotas in packaging markets.

C. Financing structure and business model. Public disclosures describe the facility as a strategic industrial investment; however, detailed capital expenditure figures have not been formally published. The business model is based on the production of chemically recycled feedstock that can be marketed as lower-carbon or circular input material within polymer value chains. Revenue prospects are therefore linked to regulatory drivers such as recycled-content mandates, consumer demand for sustainable materials, and potential price advantages associated with carbon-pricing mechanisms. Integration within an existing petrochemical site reduces marginal infrastructure costs and improves logistical efficiency.

D. Measurable outputs and performance indicators. According to company statements, the Wesseling plant is designed for a processing capacity of approximately 50,000 tonnes of plastic waste per year, positioning it among the largest advanced recycling facilities currently under development in Europe [30]. Lifecycle emission-reduction potential depends on the degree to which recycled feedstock substitutes fossil inputs and on energy consumption within the pyrolysis process. Quantified emission savings are therefore contingent on detailed lifecycle assessments that remain under evaluation.

E. Permitting trajectory and implementation milestones. The project entered the construction phase following the laying of the foundation stone in September 2024. Commissioning is anticipated around the mid-2020s, subject to completion of construction works,

technical integration into existing production systems, and regulatory compliance verification. Industrial chemical recycling installations are typically subject to stringent environmental permitting procedures, including emissions monitoring requirements and safety assessments.

F. Risk factors and mitigation strategies. A central operational risk concerns the availability and quality consistency of plastic waste feedstock. Long-term supply agreements with waste-management partners and improvements in sorting technologies constitute important mitigation measures. Regulatory and societal scrutiny regarding the environmental performance of chemical recycling technologies represents another challenge. Transparent lifecycle assessments, compliance with emissions standards, and credible certification schemes are therefore essential for maintaining public legitimacy and market acceptance.

Market risks are linked to price volatility in petrochemical feedstocks and uncertain demand for circular materials, particularly during early stages of market formation.

G. Policy relevance and transferability. The MoReTec project illustrates how circular-economy strategies can complement energy-focused decarbonisation policies by addressing emissions embedded in material production cycles. It demonstrates the potential for integrating waste management and petrochemical industries within regional industrial transition frameworks. For policymakers, the case highlights the importance of regulatory clarity regarding the classification and certification of chemically recycled products, as well as the role of innovation funding in enabling industrial deployment of emerging circular technologies. Similar investments may be transferable to other petrochemical clusters seeking to reduce carbon intensity while maintaining production capacity.

Case 6. Dortmund District Heating Transformation: Industrial Waste-Heat Integration and Urban Heat Network Modernisation. The Dortmund district heating modernisation project illustrates how surplus industrial process heat can be integrated into municipal heat supply systems, thereby reducing fossil fuel consumption and contributing to urban decarbonisation [32].

A. Context and technical description. The transformation of the district heating system in Dortmund represents a systemic intervention at the interface between industrial production and urban energy provision. The project centred on the utilisation of surplus process heat generated by industrial operations at the carbon black manufacturer KG Deutsche Gasrußwerke (DGW). Technically, the initiative involved the installation of condensers and heat-exchange infrastructure capable of capturing previously unused thermal energy from industrial exhaust streams. The recovered heat was then integrated into a modernised hot-water district heating network operated by the municipal utility DEW21. This transition from a steam-based system to a lower-temperature hot-water network improved overall energy efficiency and enabled the substitution of natural gas previously used for heat generation [32].

B. Stakeholder constellation. The project was implemented through cooperation between the industrial heat supplier DGW, the municipal energy utility DEW21, and the City of Dortmund as planning authority. Financial support was provided through programmes administered by the German development bank KfW, reflecting the role of public financing institutions in facilitating energy-efficiency investments. This stakeholder configuration demonstrates the importance of cross-sectoral collaboration in urban energy transition processes, particularly where industrial infrastructure can be leveraged for municipal decarbonisation objectives.

C. Financing structure and business model. Public information indicates that the industrial partner invested approximately €5.3 million in the installation of condensers and related integration technologies. A portion of these investments was supported through KfW funding schemes designed to promote energy efficiency and climate mitigation projects [32]. From a business perspective, the project enables the monetisation of surplus industrial heat that would otherwise be dissipated. The municipal utility benefits from reduced fuel procurement costs and improved system efficiency, while industrial partners gain additional revenue streams and enhanced environmental performance.

D. Measurable outputs and performance indicators. Project documentation reports an estimated annual reduction of approximately 45,000 tonnes of CO_2 emissions associated with the modernised district heating system. These reductions result primarily from decreased reliance on fossil gas for urban heat generation [32]. Additional performance improvements include enhanced network efficiency and the long-term stabilisation of heat supply costs for connected buildings.

E. Permitting trajectory and implementation milestones. The modernisation process involved phased planning and infrastructure upgrades over several years, including industrial-site modifications, network retrofitting, and customer-side adaptations. Environmental permitting procedures were required for the installation of heat-recovery equipment and network conversion measures.. Such urban heat transformation projects typically proceed incrementally in order to maintain supply reliability and manage capital expenditure constraints.

F. Risk factors and mitigation strategies. Operational risks include dependence on the continuity of industrial heat supply. Contractual arrangements and the maintenance of auxiliary heat-generation capacity provide safeguards against potential disruptions. Technical integration challenges arise from the conversion of legacy steam networks to modern hot-water systems, necessitating coordinated engineering solutions and stakeholder communication strategies.

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

Financial risks are mitigated through public funding instruments and the long-term cost savings associated with improved system efficiency.

G. Policy relevance and transferability. The Dortmund case demonstrates the strategic importance of integrating industrial waste heat into urban energy planning frameworks. Such approaches offer comparatively cost-effective decarbonisation opportunities, particularly in regions characterised by dense industrial-urban spatial interdependencies. For policymakers, the project underscores the need for supportive regulatory frameworks that facilitate heat-network modernisation, as well as targeted financial instruments to overcome initial investment barriers. Similar models may be transferable to other industrial cities where surplus process heat remains underutilised.

Municipal Example. City of Cologne: Renewable Electricity Procurement and Public Building Decarbonisation. The City of Cologne's large-scale procurement of renewable electricity for municipal buildings illustrates how public-sector purchasing strategies can deliver immediate operational emission reductions while supporting the expansion of renewable energy markets [33].

A. Context and technical description. Municipal governments in Germany play an important role in climate policy implementation through the management of public infrastructure portfolios, including administrative buildings, schools, cultural institutions, and social facilities. The City of Cologne has pursued a procurement strategy aimed at sourcing renewable electricity for a substantial share of its municipal property stock. The supply contract concluded with the energy provider LichtBlick covers approximately 120 million kilowatt-hours of electricity annually, delivered to around 2,800 municipal buildings. This measure complements broader local climate action initiatives, including building energy-efficiency retrofits and the deployment of rooftop photovoltaic installations [33].

B. Stakeholder constellation. The procurement initiative is led by the municipal administration as contracting authority. The renewable electricity supplier assumes responsibility for energy delivery and certification, while municipal facility managers oversee implementation within individual buildings. Additional stakeholders include the municipal utility RheinEnergie and local climate governance bodies involved in coordinating long-term decarbonisation strategies. The initiative thus reflects the interaction between public procurement practices and broader urban energy planning processes.

C. Financing structure and business model. Financial details of the electricity supply contract have not been publicly disclosed. However, long-term procurement arrangements are typically designed to provide price stability for municipal budgets while enabling suppliers to secure predictable demand for renewable generation assets. The economic rationale is therefore twofold: reducing operational emissions associated with electricity consumption and mitigating exposure to volatility in wholesale electricity markets.

D. Measurable outputs and performance indicators. The annual supply volume of approximately 120 GWh corresponds to a significant share of municipal electricity demand. By substituting conventional grid electricity with certified renewable sources, the city effectively reduces scope-2 emissions linked to public building operations. The precise magnitude of emission reductions depends on the carbon intensity of the displaced electricity mix and certification methodologies applied.

E. Permitting trajectory and implementation milestones. The procurement strategy was implemented through standard municipal contracting procedures rather than infrastructure permitting processes. Supply arrangements commenced in the early 2020s and form part of Cologne's longer-term climate mitigation planning framework. Future milestones include potential contract extensions, expansion of on-site renewable generation capacity, and continued building-modernisation programmes.

F. Risk factors and mitigation strategies. Potential risks relate to supplier continuity and market-price fluctuations over the contract duration. These risks are typically mitigated through multi-year contractual frameworks and diversification of procurement strategies. Debates concerning the additionality of renewable electricity sourcing also represent a reputational consideration for municipal authorities. Transparent certification mechanisms and the integration of procurement with local generation projects can enhance policy credibility.

G. Policy relevance and transferability. The Cologne example demonstrates that municipalities can act as influential market actors in the energy transition by leveraging their purchasing power to stimulate demand for renewable electricity. Such procurement strategies offer comparatively rapid emission-reduction opportunities, particularly when combined with building-efficiency improvements and decentralised generation initiatives. From a policy perspective, the case highlights the importance of aligning public-sector procurement rules with climate objectives and supporting local administrative capacity to manage complex energy contracts. The approach is readily transferable to other cities seeking cost-effective pathways to reduce operational emissions.

Findings

The six empirical cases analysed in this study reveal that the energy sector transformation in North Rhine-Westphalia does not follow a single technological trajectory but rather unfolds as a multi-dimensional restructuring of an historically carbon-intensive industrial system. The cases demonstrate that decarbonisation processes in advanced manufacturing regions are characterised by the simultaneous transformation of production technologies, energy supply infrastructures,

material cycles, urban energy systems, and governance mechanisms.

A first cross-cutting observation concerns the centrality of industrial process transformation as a driver of regional transition dynamics. Projects such as tkH_2Steel indicate that deep emission reductions in heavy industry require fundamental changes in production routes rather than incremental efficiency improvements. The shift towards hydrogen-based direct reduction exemplifies a systemic technological substitution that affects not only plant-level operations but also upstream energy supply chains and regional infrastructure planning. At the same time, the Carbon2Chem initiative demonstrates that decarbonisation strategies increasingly extend beyond fuel substitution to include carbon-management approaches, integrating capture and utilisation pathways into industrial value creation processes. This diversification of technological options reflects the structural complexity of emissions sources in integrated industrial clusters.

A second pattern emerging from the comparative analysis relates to the infrastructural preconditions of industrial decarbonisation. The planned electrolysis hub at Duisburg-Walsum highlights that low-carbon industrial production is contingent upon the development of new energy supply systems, particularly hydrogen generation capacity and associated transport networks. In parallel, the HyCologne initiative illustrates that infrastructure deployment requires institutional coordination mechanisms capable of aligning investment decisions across multiple actors and administrative jurisdictions. These cases underscore that technological feasibility alone is insufficient; the timing and spatial configuration of infrastructure development constitute critical determinants of transition success.

Third, the cases reveal the growing importance of material-efficiency and circular-economy strategies within regional decarbonisation portfolios. The MoReTec chemical recycling project demonstrates that emission reductions in industrial regions are not limited to energy systems but also involve the restructuring of raw-material cycles. By integrating waste streams into petrochemical production processes, such initiatives address lifecycle emissions embedded in industrial consumption patterns. This suggests that energy transition policies increasingly intersect with broader industrial transformation agendas encompassing resource efficiency, product regulation, and innovation policy.

A fourth analytical dimension concerns the interaction between industrial production and urban energy systems. The Dortmund district heating project illustrates how surplus industrial heat can be mobilised as a strategic asset for municipal decarbonisation. This case exemplifies the spatial interdependence of industrial and urban infrastructures in legacy manufacturing regions. Rather than treating cities and industrial sites as separate transition arenas, the evidence indicates that effective emission reduction strategies often rely on cross-sectoral integration and cooperative governance arrangements.

Finally, the municipal procurement strategy of the City of Cologne highlights the role of public-sector demand aggregation as a catalyst for market transformation. While technologically less complex than industrial conversion projects, such measures can generate immediate emission reductions and provide stable demand signals for renewable energy expansion. This demonstrates that energy transition processes operate simultaneously at multiple scales, from high-capital industrial investments to comparatively low-cost administrative interventions.

Taken together, the cases suggest that the energy sector transformation in North Rhine-Westphalia is best conceptualised as a systemic reconfiguration of an industrial energy regime shaped by historical path dependencies. The coexistence of hydrogen innovation, circular material strategies, infrastructure coordination platforms, and municipal policy instruments reflects the need for diversified transition pathways capable of addressing heterogeneous emission sources.

From a governance perspective, the comparative evidence confirms that successful decarbonisation in industrialised regions depends on vertical policy alignment and horizontal actor coordination. Federal regulatory frameworks establish long-term climate targets and market incentives, but their practical implementation is mediated through regional industrial structures and municipal investment capacities. The NRW cases therefore illustrate the operational realities of multi-level energy governance in a context where economic competitiveness and climate mitigation objectives must be pursued simultaneously.

The findings contribute to ongoing debates on the feasibility of climate-neutral industrial transformation in Europe's traditional manufacturing heartlands. The regional experience suggests that decarbonisation is not a linear process of technological substitution, but rather a broader restructuring of production systems that involves infrastructural investment, institutional change, and socio-economic adaptation.

Conclusion. This study has examined the energy sector transformation in North Rhine-Westphalia as a process of structural transformation unfolding within one of Europe's most historically carbon-intensive industrial regions. By combining institutional policy analysis with empirically grounded case studies, the article has demonstrated that decarbonisation in advanced manufacturing territories cannot be understood as a simple technological substitution of energy carriers. Rather, it represents a complex and negotiated reconfiguration of production systems shaped by long-term industrial path dependencies, infrastructural lock-ins, and multi-level governance arrangements.

The legislative analysis shows that Germany's energy transition is structured through a dense regulatory architecture that establishes binding climate targets, market incentives, and spatial planning obligations. Yet the empirical evidence from North Rhine-Westphalia indi-

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

cates that the practical effectiveness of these frameworks depends on their translation into regionally adapted implementation strategies. Industrial decarbonisation initiatives such as hydrogen-based steel production, carbon-utilisation technologies, and large-scale electrolysis infrastructure reveal the scale of investment and coordination required to transform energy-intensive production clusters. At the same time, circular-economy innovation, urban heat-network modernisation, and municipal renewable procurement strategies demonstrate that systemic transition processes extend beyond industrial core sectors into broader territorial energy systems.

A key contribution of the article lies in highlighting the interdependence between technological innovation and institutional capacity. The analysed cases show that the success of industrial transformation pathways is contingent not only on engineering feasibility but also on the synchronisation of infrastructure development, regulatory stability, financing instruments, and stakeholder cooperation across governance levels. North Rhine-Westphalia therefore provides an analytically revealing setting in which the operational realities of multi-level climate governance become visible. The region illustrates how federal policy objectives are mediated through state-level strategic coordination and implementation at the municipal level, producing differentiated transition trajectories within a common regulatory framework.

From a wider European perspective, the findings underscore the strategic importance of regional industrial policy in achieving climate neutrality. Traditional manufacturing heartlands across the continent face similar challenges related to capital-intensive production assets, workforce transition, and spatial concentration of emissions. The experience of North Rhine-Westphalia suggests that effective decarbonisation strategies must combine long-term public support for first-mover investments with mechanisms that maintain industrial competitiveness and social stability. Energy sector transformation in such contexts is therefore best conceptualised as a socio-economic restructuring process rather than solely an environmental policy agenda.

At the same time, the analysis points to several unresolved uncertainties. The economic viability of hydrogen-based industrial production, the scalability of carbon-utilisation technologies, and the long-term performance of circular material strategies remain contingent on evolving market conditions and regulatory developments. Moreover, the success of municipal and regional transition initiatives depends on administrative capacity and financial resources that may vary significantly across territories. These dynamics highlight the need for continued empirical monitoring and comparative research on industrial decarbonisation pathways.

Future research could therefore extend the analytical framework developed in this study by examining cross-regional learning processes within the European Union, assessing the distributional implications of industrial climate policies, and investigating the interaction between technological innovation and labour-market restructuring. Such perspectives are essential for understanding how climate neutrality can be reconciled with economic resilience in industrialised societies.

The North Rhine-Westphalia emerges from this analysis not merely as a regional case study but as a critical testing ground for the broader feasibility of climate-neutral industrial transformation in advanced economies. The region's experience demonstrates that the energy sector transformation is ultimately a question of systemic governance, coordinated investment, and institutional adaptability, factors that will determine whether ambitious climate targets can be translated into durable socio-economic transformation.

References

1. Nordrhein-Westfalen / Data Commons. 2024. URL: https://datacommons.org/place/nuts/DEA (Last accessed: 14.03.2026).
2. Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen der Länder / Statistische Ämter des Bundes und der Länder. URL: https://www.statistik-portal.de/de/vgrdl (Last accessed: 14.03.2026).
3. Kim J. Energy, material, and resource efficiency for industrial decarbonization: A systematic review of sociotechnical systems, technological innovations, and policy options. *Energy Research and Social Science*. 2024. Vol. 112. URL: https://doi.org/10.1016/j.erss.2024.103521 (Last accessed: 17.03.2026).
4. Lockwood M., Herman K., Iskandarova M., Pultar A., Ferrier J., Sovacool B. Beyond industrial decarbonisation strategy: Lessons from bottom-up policy mixes. *Energy Research and Social Science*. 2025. Vol. 130. URL: https://doi.org/10.1016/j.erss.2025.104431 (Last accessed: 17.03.2026).
5. Norris L., Bristow G., Cotterill E., Healy A., Marshall A. P. Decarbonisation, place attachment and agency: just transition in old industrial regions. *Contemporary Social Science*. 2024. Vol. 19(1–3). Pp. 283–302. URL: https://doi.org/10.1080/21582041.2024.2323106 (Last accessed: 20.03.2026).
6. Rattle I., Gailani A., Taylor, P.G. Decarbonisation strategies in industry: going beyond clusters. *Sustain Science.* 2024. Vol. 19. Pp. 105–123. URL: https://doi.org/10.1007/s11625-023-01313-4 (Last accessed: 20.03.2026).
7. Raillard-Cazanove Q., Knibiehly T., Girard R. Decarbonisation of industry and the energy system: Exploring mutual impacts and investment planning. *Physics and Society, Cornell University.* 2024. URL: https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.23025 (Last accessed: 20.03.2026).
8. Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien / Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. 2023. URL: https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/BJNR106610014.html (Last accessed: 19.03.2026).
9. Energiewirtschaftsgesetz / Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. 2005. URL: https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Gesetze/Energie/EnWG.html (Last accessed: 19.03.2026).

10. Bundes-Klimaschutzgesetz / Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. 2024. URL: https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/BJNR251310019.html (Last accessed: 19.03.2026).
11. Gebäudeenergiegesetz / Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. 2020, 2024. URL: https://www.bmwsb.bund.de/DE/bauen/innovation-klimaschutz/gebaeudeenergiegesetz/gebaeudeenergiegesetz_node.html (Last accessed: 19.03.2026).
12. Gesetz für die Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze / Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. 2023. URL: https://www.bmwsb.bund.de/SharedDocs/gesetzgebungsverfahren/DE/kommunale-waermeplanung.html (Last accessed: 24.03.2026).
13. Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und der Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung / Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. 2025. URL: https://www.gesetze-im-internet.de/kwkg_2016/BJNR249810015.html (Last accessed: 24.03.2026).
14. Gesetz zur Festlegung von Flächenbedarfen und zur Genehmigungserleichterung für Windenergieanlagen an Land und für Anlagen zur Speicherung vom Strom oder Wärme aus erneuerbaren Energien in bestimmten Gebieten / Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. 2022, 2025. URL: https://www.gesetze-im-internet.de/windbg/BJNR135310022.html (Last accessed: 24.03.2026).
15. Energie- und Wärmestrategie Nordrhein-Westfalen / Ministerium für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen. 2024. URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.wirtschaft.nrw/system/files/media/document/file/mwike_br_warmestrategie_langfassung_web-pdf.pdf (Last accessed: 24.03.2026).
16. Das Bürgerenergiegesetz Nordrhein-Westfalen 2023 : website. URL: https://www.wirtschaft.nrw/buergerenergiegesetz-nrw (Last accessed: 25.03.2026).
17. Kommunale Wärmeplanung : website. URL: https://www.bra.nrw.de/energie-bergbau/energiewende-erneuerbare-energien-energieeffizienz/landeswaermeplanungsgesetz-kommunale-waermeplanung (Last accessed: 25.03.2026).
18. Thyssenkrupp Steel: tkH_2Steel : website. URL: https://www.thyssenkrupp.com/en/home (Last accessed: 06.04.2026).
19. Thyssenkrupp press release on hydrogen tender and renewable electricity sourcing: : website. URL: https://www.thyssenkrupp.com/en/newsroom/press-releases/pressdetailpage/thyssenkrupp-steel-is-intensively-pushing-ahead-with-developing-the-hydrogen-economy:-call-for-tenders-for-supplying-hydrogen-to-the-first-direct-reduction-plant-at-the-duisburg-location-251160 (Last accessed: 10.04.2026).
20. H2R – Wasserstoff Rheinland. Regional hydrogen cluster information : website. URL: https://hycologne.de/projekt/h2r-wasserstoff-rheinland/ (Last accessed: 10.04.2026).
21. Germany's Thyssenkrupp reviews green steel production plans, shares fall : website. URL: https://www.reuters.com/markets/commodities/thyssenkrupp-reviews-plans-green-steel-production-2024-10-07/ (Last accessed: 23.04.2026).
22. Thyssenkrupp Steel an RWE sign a contract for supply of green electricity to the first direct reduction plant : website. URL: https://www.thyssenkrupp.com/en/newsroom/press-releases/pressdetailpage/thyssenkrupp-steel-an-rwe-sign-a-contract-for-supply-of-green-electricity-to-the-first-direct-reduction-plant-251252 (Last accessed: 23.04.2026).
23. Carbon2Chem : website. URL: https://www.thyssenkrupp-carbon2chem.com (Last accessed: 10.04.2026).
24. Carbon2Chem – A Key Building Block for the Climate Protection : website. URL: https://www.umsicht.fraunhofer.de/en/carbonmanagement/carbon-cycle.html#:~:text=Carbon2Chem%C2%AE%20%E2%80%93%20A%20Key%20Building,instead%20of%20fossil%20raw%20materials (Last accessed: 10.04.2026).
25. HydrOxy Hub Walsum. Klimaneutral mit Wasserstoff von Iqony aus Walsum : website. URL: https://www.iqony.energy/projekte/detail/hydroxy-hub-walsum (Last accessed: 03.04.2026).
26. Iqony: Hydrogen project in Duisburg-Walsum wins EU funding. The planned HydrOxy Hub hydrogen production plant is one of 41 European projects supported by the EU Innovation Fund – a reward for substantial greenhouse gas savings : website. URL: https://www.iqony.energy/en/press/hydrogen-project-in-duisburg-walsum-wins-eu-funding#:~:text=Under%20the%20name%20of%20HydrOxy,district%20heating%20in%20the%20future (Last accessed: 12.04.2026).
27. Green hydrogen for green steel made in Duisburg: STEAG and thyssenkrupp are planning joint hydrogen project : website. URL: https://www.thyssenkrupp.com/en/newsroom/press-releases/pressdetailpage/green-hydrogen-for-green-steel-made-in-duisburg--steag-and-thyssenkrupp-are-planning-joint-hydrogen-project-91317 (Last accessed: 12.04.2026).
28. H2R – Wasserstoff Rheinland : website. URL: https://hycologne.de/projekt/h2r-wasserstoff-rheinland/ (Last accessed: 12.04.2026).
29. Gemeinsam für eine gesunde Umwelt und eine starke Region.HyCologne – Wasserstoff Region Rheinland e.V. : website. URL: https://hycologne.de/ (Last accessed: 18.04.2026).
30. LYB lays foundation for first industrial-scale advanced recycling plant at Wesseling, Germany site : website. URL: https://www.lyondellbasell.com/en/who-we-are/updates-events/corporate--financial-news/lyb-lays-foundation-for-1st-industrial-scale-advanced-recycling-plant-at-wesseling-germany-site/ (Last accessed: 21.04.2026).
31. MoReTec : website. URL: https://www.lyondellbasell.com/en/our-solutions/circular-low-carbon-solutions/chemical-recycling/moretec/ (Last accessed: 21.04.2026).
32. Energy efficiency. New heat supply for Dortmund's city : website. URL: https://www.kfw.de/stories/environment/energy-efficiency/transformed-heat-supply-in-dortmund/ (Last accessed: 22.04.2026).
33. Klimaschutz: LichtBlick versorgt Köln mit Ökostrom : website. URL: https://www.lichtblick.de/presse/klimaschutz-lichtblick-versorgt-koeln-mit-oekostrom/ (Last accessed: 22.04.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 30.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 504.054:656.13:504.064.2
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.31

ОЦІНКА НАКОПИЧУВАЛЬНОГО ЕКОЛОГІЧНОГО РИЗИКУ В ЗОНАХ ВИСОКОЇ ІНТЕНСИВНОСТІ РУХУ ТРАНСПОРТУ

Демчук Л.І.[1], **Алпатова О.М.**[1], **Скиба Г.В.**[1], **Русецька Н.М.**[2]
[1]Державний університет «Житомирська політехніка»
вул. Чуднівська 103, 10005, м. Житомир
[2]Житомирський агротехнічний коледж
вул. Покровська, 96, 10031, м. Житомир
ke_dlm@ztu.edu.ua

У сучасному урбанізованому середовищі стрімке зростання кількості транспортних засобів та інтенсивності дорожнього руху призводить до безперервного надходження забруднюючих речовин у довкілля. Це створює серйозну загрозу як для локальних екосистем, так і для здоров'я населення. З огляду на це, критично важливою є комплексна оцінка не лише разових викидів, але й накопичувального (кумулятивного) екологічного ризику, що виникає внаслідок тривалої та системної експозиції токсичних сполук у придорожніх зонах з високим транспортним навантаженням.

Метою цієї роботи є визначення рівня кумулятивного екологічного ризику на прилеглих до автомагістралей територіях з урахуванням багатокомпонентного характеру забруднення. Методологія дослідження базується на комплексному аналізі концентрацій важких металів, дрібнодисперсного пилу ($PM_{2.5}$ та PM_{10}), оксидів нітрогену й карбону в атмосферному повітрі, ґрунтах і придорожній рослинності. Для розрахунку загального індексу екологічної небезпеки застосовано багатокритеріальні моделі оцінки ризику, що дозволяють врахувати просторовий розподіл і синергетичний ефект взаємодії кількох полютантів при їх тривалому накопиченні.

Результати дослідження підтверджують, що в зонах з високим трафіком формуються стійкі ореоли акумуляції токсичних речовин, де рівень екологічного ризику поступово досягає критичних значень. Встановлено, що найбільший внесок у формування накопичувальної небезпеки роблять важкі метали (зокрема свинець, кадмій, мідь, цинк) та поліциклічні ароматичні вуглеводні, які депонуються у верхніх шарах ґрунту і здатні мігрувати трофічними ланцюгами. Виявлено пряму кореляційну залежність між інтенсивністю транспортного потоку, тривалістю експлуатації ділянки дороги та експоненційним зростанням індексу кумулятивного ризику.

Отримані дані мають вагоме практичне значення для розробки дієвих стратегій екологічної безпеки міських агломерацій та управління транспортними системами. Результати оцінки накопичувального ризику можуть слугувати науковим підґрунтям для оптимізації транспортних розв'язок, впровадження жорсткіших стандартів моніторингу та просторового планування придорожніх зон. На основі висновків запропоновано комплекс мітигаційних заходів, зокрема створення ефективних багатоярусних фітобар'єрів та вдосконалення дренажних систем для зниження рівня вторинного забруднення. *Ключові слова:* накопичувальний екологічний ризик, інтенсивність руху, забруднення довкілля, важкі метали, кумулятивний ефект, сталий розвиток, транспортне навантаження, придорожні екосистеми, екологічний моніторинг, управління ризиками.

Assessment of cumulative environmental risk in areas with high traffic intensity Demchuk L., Alpatova O., Skyba O., Rusetska N.

In today's urban environment, the rapid growth in the number of vehicles and traffic intensity leads to a continuous influx of pollutants into the environment. This poses a serious threat to both local ecosystems and public health. In view of this, it is critically important to comprehensively assess not only one-off emissions, but also the cumulative environmental risk arising from prolonged and systematic exposure to toxic compounds in roadside areas with high traffic loads.

The aim of this work is to determine the level of cumulative environmental risk in areas adjacent to motorways, taking into account the multi-component nature of pollution. The research methodology is based on a comprehensive analysis of the concentrations of heavy metals, fine particulate matter ($PM_{2.5}$ and PM_{10}), nitrogen oxides, and carbon in the atmosphere, soil, and roadside vegetation. To calculate the overall environmental hazard index, multi-criteria risk assessment models were used, which allow for the spatial distribution and synergistic effect of the interaction of several pollutants during their long-term accumulation to be taken into account.

The results of the study confirm that in areas with high traffic, stable halos of toxic substance accumulation are formed, where the level of environmental risk gradually reaches critical values. It has been established that heavy metals (in particular, lead, cadmium, copper, zinc) and polycyclic aromatic hydrocarbons, which are deposited in the upper layers of the soil and are capable of migrating through food chains, make the greatest contribution to the formation of cumulative danger. A direct correlation has been found between traffic intensity, the duration of road use, and the exponential growth of the cumulative risk index.

The data obtained are of great practical importance for the development of effective strategies for the environmental safety of urban agglomerations and the management of transport systems. The results of the cumulative risk assessment can serve as a scientific basis for optimizing transport interchanges and introducing stricter standards for monitoring and spatial planning of roadside areas. Based on the conclusions, a set of mitigation measures is proposed, including the creation of effective multi-tiered phytobarriers and the improvement of drainage systems to reduce secondary pollution. *Key words:* cumulative environmental risk, traffic intensity, environmental pollution, heavy metals, cumulative effect, sustainable development, transport load, roadside ecosystems, environmental monitoring, risk management.

© Демчук Л.І., Алпатова О.М., Скиба Г.В., Русецька Н.М., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. Сучасні урбанізовані території стикаються з безперервним антропогенним навантаженням, серед якого ключову роль відіграє автомобільний транспорт. Проблема полягає не лише в миттєвих викидах забруднюючих речовин (діоксиду нітрогену, чадного газу, сажі), а й у їхньому поступовому акумулюванні в компонентах довкілля – ґрунтах, поверхневих водах та придорожній рослинності. У зонах високої інтенсивності руху (на великих перехрестях, транспортних розв'язках, магістралях) формується специфічне мікросередовище, де екологічний ризик втрачає лінійний характер і набуває кумулятивних (накопичувальних) властивостей. Традиційні методи моніторингу часто фіксують лише поточні концентрації в повітрі, залишаючи поза увагою довгострокові наслідки синергетичної дії накопичених токсикантів (зокрема, важких металів, поліциклічних ароматичних вуглеводнів та мікропластику від зносу шин) на екосистеми та здоров'я населення.

Актуальність дослідження. Незважаючи на поступовий перехід до електромобілів, транспортні засоби з двигунами внутрішнього згоряння ще довго залишатимуться домінуючими на дорогах, особливо в країнах, що розвиваються, та державах із перехідною економікою. Крім того, невичерпні викиди (зношення гальмівних колодок, шин, дорожнього покриття) залишаються актуальними для будь-якого типу транспорту. В умовах щільної міської забудови та зміни клімату (що часто призводить до застою повітряних мас та утворення смогу) своєчасна та точна оцінка накопичувального екологічного ризику стає критично необхідною. Вона дозволяє не просто констатувати факт забруднення, а й прогнозувати точку неповернення для локальних екосистем, що робить це дослідження вкрай нагальним для сучасного урбоекологічного планування.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Робота безпосередньо пов'язана з реалізацією Цілей сталого розвитку ООН, зокрема, ціль 3, 11. На практичному рівні дослідження відповідає завданням національних та регіональних програм з охорони довкілля, розробки стратегій «розумного міста» та оптимізації транспортних потоків. Отримані результати можуть слугувати науковим підґрунтям для роботи муніципальних екологічних інспекцій, санітарно-епідеміологічних служб та архітектурних бюро під час проєктування буферних зелених зон.

Аналіз наукових публікацій. Kumar P. та ін. у своїй праці «Оцінка ризиків для довкілля від викидів твердих частинок у зонах інтенсивного трафіку» проаналізували прямий вплив дрібнодисперсних частинок ($PM_{2.5}$, PM_{10}) на придорожні екосистеми [1]. Доведено, що концентрація полютантів експоненціально спадає з віддаленням від дороги, але створює стійкі зони ризику в межах 50-метрової смуги. Tian Z., Kole P. та ін. «Дослідження токсикологічного впливу продуктів зношення автомобільних шин (зокрема 6PPD-хінону)» [2] дослідити невичерпні джерела забруднення транспорту. Виявили, що мікропластик та хімічні сполуки від зносу шин і гальмівних колодок змиваються у ґрунти та водойми, створюючи довгостроковий накопичувальний екологічний ефект, токсичний для біоти. Gulia S. та ін. «Просторовий аналіз та ГІС-моделювання розсіювання транспортних полютантів» [3] створили карти вразливості міських територій до акумуляції важких металів (Pb, Zn, Cu). Розробили просторові моделі, які доводять, що рельєф, міська забудова та швидкість вітру критично впливають на зони накопичення токсикантів на перехрестях. Chen Y., Wang L. та ін. «Синергетичний ефект транспортного забруднення та міських островів тепла» [4] дослідили взаємодію кліматичних змін та автомобільного забруднення та обґрунтували, що підвищення температури (теплові хвилі) суттєво посилює токсичність накопичених у ґрунті придорожніх зон хімічних сполук, прискорюючи їх перехід у рухомі форми.

Можна зазначити, що хоча наукова спільнота вже активно застосовує просторовий аналіз та досліджує окремі компоненти (наприклад, тільки важкі метали або тільки мікропластик), але досі бракує комплексного алгоритму. Алгоритму, який би не просто фіксував забруднення, а дозволяв би муніципалітетам оцінювати накопичувальний ефект у динаміці та швидко приймати управлінські рішення на локальному рівні.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Незважаючи на значну кількість праць, присвячених транспортному забрудненню, проблема накопичувального екологічного ризику залишається фрагментарно дослідженою. Більшість існуючих моделей оцінюють ризик від кожного забруднювача окремо (адитивна модель) і спираються на короткострокові вимірювання. Досі бракує комплексних методичних підходів, які б враховували не лише поточну емісію, але й історичне накопичення поллютантів у депонуючих середовищах (ґрунт, біота) з урахуванням локальних мікрокліматичних та топографічних особливостей конкретних транспортних вузлів.

Новизна полягає у розробці (або вдосконаленні) комплексної моделі оцінки екологічного ризику, яка вперше кількісно враховує синергетичний ефект та часовий фактор накопичення багатокомпонентного забруднення в зонах інтенсивного автомобільного руху. Запропоновано новий алгоритм розрахунку кумулятивного індексу небезпеки, що поєднує дані про викиди з вихлопних труб із показниками вторинного забруднення (пил від зносу шин і асфальту) та здатністю локальних екосистем до самоочищення.

Методологічне або загальнонаукове значення полягає у створенні універсального аналітичного інструментарію, який розширює межі екологічного

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

аудиту урбанізованих територій. Запропонований підхід може бути екстрапольований на інші типи антропогенного навантаження. Загальнонаукова цінність результатів формує нове розуміння динаміки трансформації міських екосистем в умовах хронічного транспортного стресу, що створює базу для подальших досліджень у галузі екотоксикології, урбаністики та екологічного менеджменту.

Виклад основного матеріалу. Створення ефективної системи еколого-гігієнічної безпеки одна із найважливіших умов досягнення сталого соціально-економічного розвитку суспільства. Система еколого-гігієнічної безпеки є одним із ключових блоків національної політики досягнення санітарно-епідеміологічного благополуччя на шляху до сталого розвитку суспільства [7]. Під поняттям екологічної безпеки розуміють сукупність принципів, методів та управлінських механізмів, спрямованих на захист життя здоров'я людини та суспільства [9].

Житомирська область має розгалужену мережу автомобільних доріг (державного та місцевого значення), яка забезпечує вантажні та пасажирські потоки внутрішньодержавні (України), транзитні транспортні потоки (Європи), та внутрішньо обласні. Регулярним автобусним сполученням охоплено всі міста та 99 % сільських населених пунктів області, 16 населених пунктів неохоплені транспортним сполученням.

За станом на 01.01.2025 протяжність автомобільних доріг загального користування Житомирської області становила 8548 км, із них із твердим покриттям – 8338 км, або 97,5% від наявності шляхів. Дороги державного й місцевого значення забезпечують зв'язки із зарубіжжям та обласними центрами регіонів України. Головне транспортне навантаження приймають дві міжнародні автодороги державного значення: Київ-Чоп (М-06), Київ – Ковель – Ягодин (М07).

Автотранспортні засоби викидають в атмосферне повітря близько 200 шкідливих речовин, серед яких: оксиди вуглецю, азоту, сірки, важких металів, канцерогенні та мутагенні з'єднання і т.д. За рік легковий автомобіль забирає з атмосферного повітря 4350 кг кисню, а замість нього викидає 3250 кг вуглекислого та 530 чадного газу, 90-150 кг незгорівших вуглеводів, 40 кг оксидів азоту, 1 кг свинцю. Зокрема, 96% оксиду вуглецю, 30% оксиду азоту, 68% вуглеводів потрапляють у навколишнє середовище через вихлопні труби автотранспорту. А неправильне керування транспортними засобами призводить до збільшення викидів CO, C_nH_m – на 25-30%, NO_x – на 15%.

Аналізуючи показники забруднення повітряного басейну Житомирської області, потрібно відмітити, що при середніх показниках по області в 310,9 кг/км^2 загальної площі, найбільше навантаження спостерігається в містах Житомирі (21252 кг/км^2), Коростені (16171 кг/км^2), Малині (13850 кг/км^2), Звягель (7137кг/км^2), Бердичеві (6505 кг/км^2) (рис. 1).

До основних причин, що зумовлюють негативний вплив транспортного сектору на міське середовище відносяться:

– недолік конкретних екологічних цілей при постановці завдань в галузі забезпечення роботи АТК і його розвитку;

– неприйнятні екологічні характеристики продукції, що використовується для забезпечення функціонування АТЗ;

– незадовільний рівень технічного утримання парку АТЗ та всього АТК;

– низька якість доріг і поганий їх розвиток;

– недоліки в системі координування перевезень та руху АТЗ.



Рис.1. Загальна площа навантаження автомобільного транспорту

Оцінка накопичувального (кумулятивного) екологічного ризику в зонах інтенсивного руху транспорту є критичним завданням для сучасної екології та медицини [7]. Це зумовлено тим, що негативний вплив на здоров'я людини та довкілля формується не одним фактором, а сукупністю хімічних, фізичних та біологічних чинників, що діють одночасно протягом тривалого часу.

Транспортний сектор забезпечує від 70% до 90% усіх шкідливих викидів в атмосферу. На відміну від промислових підприємств, транспортні викиди зосереджені в приземному шарі повітря (на рівні 0,5–1,5 м), що максимально наближає їх до дихальних шляхів людини.

Накопичувальний ефект виникає через те, що забруднювачі мають властивість акумулюватися в компонентах екосистеми: ґрунті, рослинності та організмі людини. Зокрема, важкі метали, такі як свинець (Pb) та кадмій (Cd), не розкладаються, а лише змінюють форми сполук, постійно отруюючи довкілля.

Основними компонентами викидів є оксиди вуглецю (CO), азоту (NO_x), діоксид сірки (SO_2), неметанові леткі органічні сполуки та дрібнодисперсний пил ($PM_{2.5}$ та PM_{10}). Останній вважається найбільш небезпечним через здатність проникати глибоко в легені та потрапляти в кров.

Крім хімічного забруднення, зони інтенсивного руху характеризуються високим рівнем шумового навантаження. Постійний шум понад 65-70 дБ призводить до хронічного стресу, порушень сну та серцево-судинних захворювань, посилюючи токсичну дію хімічних речовин.

Методологія оцінки ризику базується на визначенні коефіцієнта неканцерогенної небезпеки (HQ) та сумарного індексу небезпеки (HI). Останній розраховується як сума відношень фактичних концентрацій до гранично допустимих для всіх речовин з однаковою спрямованістю дії:

$$HI = \sum_{i=1}^{n} \frac{Ci}{RfCi},$$

де:
C_i – концентрація речовини,
RfC_i – її референтна (безпечна) концентрація.

Важливим аспектом є оцінка канцерогенного ризику (CR), який пов’язаний з наявністю у викидах бензолу, формальдегіду та бенз(а)пірену. Згідно з класифікацією ВООЗ, ризик вважається прийнятним, якщо імовірність розвитку раку протягом життя не перевищує 10^{-6} (один випадок на мільйон населення).

Аналіз стану ґрунтів уздовж автомагістралей свідчить про значне перевищення фонових концентрацій металів у 5–10-метровій зоні від краю проїжджої частини (табл.1.). Це створює загрозу вторинного забруднення повітря пилом, який містить ці токсиканти.

Зелені насадження в таких зонах виконують роль біофільтрів, проте вони самі зазнають деградації. Хлороз листя, передчасне обпадання та накопичення шкідливих речовин у тканинах рослин є індикаторами високого рівня екологічного навантаження.

Математичне моделювання розсіювання викидів дозволяє прогнозувати зони ризику. Встановлено, що концентрація забруднювачів різко знижується на відстані 50–100 метрів від дороги, проте за наявності "вуличних каньйонів" (щільної висотної забудови) шкідливі речовини затримуються надовго.

Для об'єктивної оцінки необхідно враховувати синергізм факторів. Наприклад, висока вологість повітря сприяє утворенню кислотних туманів з оксидів азоту та сірки, що значно підвищує корозійну активність середовища та агресивність до слизових оболонок людей.

Статистичні дані свідчать про кореляцію між інтенсивністю руху та ростом захворюваності на астму та алергію у дітей, що проживають у радіусі 200 метрів від магістралей. Накопичувальний ефект проявляється через 5–10 років постійного впливу.

Важливу роль грає структура автопарку. Велика частка дизельних двигунів та вантажного транспорту збільшує викиди сажі та оксидів азоту, що робить внесок у формування фотохімічного смогу.

Економічні збитки від екологічних ризиків включають витрати на лікування населення, втрату робочого часу та зниження врожайності прилеглих територій. Оцінка цих збитків є підґрунтям для впровадження екологічних податків та зон низьких викидів.

Сучасні ГІС-технології (геоінформаційні системи) дозволяють створювати динамічні карти ризику. Вони поєднують дані про інтенсивність трафіку, метеоумови та щільність населення, що допомагає в реальному часі визначати найнебезпечніші ділянки.

Підсумовуючи, накопичувальний екологічний ризик у зонах інтенсивного руху є комплексним показником. Його моніторинг має бути пріоритетом для міського планування, адже ігнорування кумулятивних ефектів сьогодні призведе до незворотних наслідків для здоров'я майбутніх поколінь.

Необхідно переходити від простого контролю концентрацій окремих речовин до інтегральної оцінки якості середовища, враховуючи сумарну токсичність та фізичне навантаження на людину.

Головні висновки. Проведене дослідження дозволяє зробити низку важливих узагальнень щодо природи та динаміки екологічних ризиків у зонах інтенсивного автомобільного руху:

– доведено, що традиційний підхід, який фокусується виключно на поточних викидах (адитивна модель), є недостатнім для об'єктивної оцінки стану довкілля. Накопичувальний екологічний ризик

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

Таблиця 1

Показник	Низька інтенсивність (<500 авт/год)	Середня інтенсивність (500-2000 авт/год)	Висока інтенсивність (>2000 авт/год)
Рівень шуму, дБ	50–60	65–75	80+
Концентрація NO_2	< ГДК	1.5–2 ГДК	3–5 ГДК
Ризик здоров'ю	Мінімальний	Помірний	Високий/Критичний

формується внаслідок тривалого акумулювання важких металів, мікропластику від зносу шин та інших токсикантів у депонуючих середовищах, що вимагає переходу до моделей кумулятивного аналізу.

– встановлено, що в придорожніх зонах різні групи полютантів взаємодіють між собою, посилюючи загальний негативний вплив на біоту. Цей вплив додатково каталізується локальними мікрокліматичними змінами, зокрема ефектом «міських островів тепла».

– застосування сучасних методів просторового аналізу, теплових карт та алгоритмів штучного інтелекту дозволяє з високою точністю виявляти локації з найвищим кумулятивним ризиком і прогнозувати динаміку його зростання.

Практичне значення та перспективи подальших досліджень. Отримані результати мають не лише теоретичну, а й виражену прикладну цінність для муніципального управління та урбоекології. Сформовані алгоритми оцінки та побудовані теплові карти екологічного ризику створюють міцну наукову базу для впровадження технологічних інновацій у просторове планування. Виявлення зон критичного накопичення токсикантів дозволяє перейти до точкового, науково обґрунтованого проєктування захисних зелених смуг. Наприклад, для регіональних центрів (таких як Житомир чи інші міста, де проблема оптимізації транспортних потоків та збереження довкілля стоїть доволі гостро), ці дані є ключовими для застосування сучасних технологій лісовідновлення та створення цільових фітобар'єрів. Замість хаотичного озеленення, муніципалітети зможуть висаджувати дерева саме там, де теплові карти фіксують максимальне акумулювання викидів.

Перспективи подальших досліджень доцільно спрямувати на вивчення фіторемедіаційного потенціалу конкретних видів рослин – тобто їхньої здатності поглинати та нейтралізувати накопичені у ґрунті багатокомпонентні забруднювачі в умовах хронічного транспортного стресу.

Література

1. Kumar P., Omidvarborna H., Barwise Y., Tiwari A. Environmental risk assessment of particulate matter emissions in high-traffic zones. *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 755. P. 142549. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142549
2. Tian Z., Kole P. J., Zhao H., Peter K. T., Kolodziej E. P. Toxicological impact of tire wear products: 6PPD-quinone accumulation and aquatic toxicity. *Environmental Science & Technology*. 2022. Vol. 56, № 1. P. 123–132. https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03532
3. Gulia S., Kumar A., Khare M. Spatial analysis and GIS-based modeling of traffic-induced pollutant dispersion in urban intersections. *Atmospheric Environment*. 2023. Vol. 294. P. 119456. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119456
4. Chen Y., Wang L., Zhang H., Liu X. Synergistic effects of traffic pollution and urban heat islands on soil toxicity in roadside ecosystems. Environmental Pollution. 2024. Vol. 341. P. 122950. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122950
5. Integrative Models for Cumulative Ecological Risk Assessment in Urban Systems / European Environment Agency (Horizon Europe Programme). Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2025. 112 p.
6. Wang Z., Li J., Smith R. Application of artificial intelligence and thermal mapping for predicting cumulative environmental risk zones. Ecological Engineering. 2026. Vol. 198. P. 107015. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2025.107015
7. Демчук Л.І., Войналович І.М. Вплив екологічних ризиків на навколишнє середовище у Житомирській області. Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. 2024. № 4 (497). С. 223-230
8. Демчук Л., Алпатова О., Мельник-Шамрай В. Екологічна оцінка впливу автосервісних підприємств як стаціонарного джерела забруднення довкілля. Multidisciplinární mezinárodní vědecký magazín "Стредоевропский вестник про веду а визкум". Чеська Республіка. том. 2. № 1. 2026. вул. 361.
9. 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 стійкості та безпеки. Збірник матеріалів ІІ 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
10. Рабош, І. О. Оцінка екологічного стану територій автозаправних станцій, розташованих поблизу автомагістралей / І. О. Рабош, О. В. Кофанова, А. В. Підгорний. Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 9 (1285). – С. 236–242. doi:10.20998/2413-4295.2018.09.34.
11. Климчик О. М. Екологія міських систем / О. М. Климчик, А. П. Багмет, Є. М. Данкевич, С. І. Матковська. – Житомир: Видавець О.О. Євенок, 2016. – 460 с.

Дата першого надходження статті до видання: 30.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 911.3:[502.13/.17:330.341/.342:62](477)
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.32

ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ: ЕТИМОЛОГІЯ ПОНЯТТЯ ТА ПІДХОДИ ДО КЛАСИФІКАЦІЇ

Кричевська Д.А., Петровська М.А.
Львівський національний університет імені Івана Франка
вул. Університетська, 1, 79000, м. Львів
diana.krychevska@gmail.com, petrovskamyr@gmail.com

У статті розглянуто місце екологічних технологій у загальній системі технологічних знань. Здійснено порівняльний аналіз суміжних термінів, зокрема таких, як «технології захисту навколишнього середовища», «екологічно безпечні технології», «чисті» та «зелені» технології, «природоорієнтовані рішення», а також висвітлено їхнє походження у міжнародній науковій і нормативній практиці. Особливу увагу приділено походженню та сучасному розумінню поняття «екологічно безпечні технології» (англ. – Environmentally Sound Technologies – ESTs), які характеризуються як цілісні системи, що мінімізують антропогенний тиск на довкілля та сприяють сталому розвитку відповідно до міжнародних стандартів, включають ноу-хау, процедури, товари та послуги, обладнання, а також організаційні та управлінські процедури. Простежено еволюцію екологічно безпечних технологій: від першої генерації, що передбачала боротьбу з викидами, до другої – «технології профілактики», які зменшують екологічні наслідки, підвищують ефективність виробництва і до третьої – «екологічно сталі технології», які спрямовані на заміщення невідновлюваних ресурсів та адаптацію до незворотних змін довкілля.

Окрему увагу приділено розмежуванню екологічно безпечних технологій (ЕБТ) у промисловому виробництві та у сфері природокористування. Встановлено, що у першій групі технологій акцент робиться на зниження забруднення від виробничих процесів та економію ресурсів, у другій – на збереження та відновлення екосистем. Визначено відмінності зазначених груп технологій за цілями, об'єктами, очікуваними результатами тощо. Розглянуто підходи до класифікації ЕБТ у промисловому виробництві за сферою виробництва, способами використання ресурсів, способами очищення довкілля та рівнем інноваційності. Класифікацію ЕБТ у сфері природокористування запропоновано розглядати за напрямами природокористування та функціональним призначенням.

Актуальність роботи зумовлена необхідністю уніфікації понятійно-категоріального апарату в умовах активної євроінтеграції екологічної політики України. *Ключові слова:* довкілля, технології, екологічно безпечні технології, технології захисту навколишнього середовища, інноваційні «зелені» технології, чисті технології, природокористування, сталий розвиток, циркулярна економіка.

Environmentally safe technologies: etymology of the term and approaches to classification. Krychevska D., Petrovska M.

This article examines the role of environmental technologies within the broader system of technological knowledge. A comparative analysis of related terms is carried out, in particular, of such terms as «environmental protection technologies», «environmentally sound technologies», «green» and «clean» technologies, and «nature-oriented solutions», moreover, their origin in international scientific and regulatory practice are highlighted. Special attention is paid to the origin and contemporary understanding of the concept of «environmentally sound technologies» (ESTs), which are characterised as integrated systems that minimise anthropogenic pressure on the environment and promote sustainable development in accordance with international standards, encompassing know-how, procedures, goods and services, equipment, as well as organisational and management procedures. The evolution of environmentally sound technologies is traced: from the first generation, which focused on combating emissions, to the second – «prevention technologies», which reduce environmental impacts and improve production efficiency, and to the third – «environmentally sustainable technologies», which aim at replacing non-renewable resources and adaptation to irreversible environmental changes.

Particular attention has been paid to distinguishing between environmentally safe technologies (ESTs) in industrial production and those in the field of natural resource management. It has been established that, in the first group of technologies, the emphasis is on reducing pollution from production processes and conserving resources, whilst in the second, it is on the conservation and restoration of ecosystems. The differences between these groups of technologies in terms of objectives, targets, expected outcomes, etc., have been identified. Approaches to classifying ESTs in industrial production by sector, methods of resource use, methods of environmental remediation and level of innovation have been examined. It is proposed to consider the classification of ESTs in natural resource management according to areas of natural resource management and functional purpose.

The relevance of this work stems from the need to unify the conceptual and categorical framework in the context of the active European integration of Ukraine's environmental policy. *Key words:* environment, technologies, environmentally safe technologies, environmental protection technologies, innovative «green» technologies, clean technologies, sustainable use of natural resources, sustainable development, circular economy.

Постановка проблеми. Сучасний етап розвитку глобальної економіки характеризується стрімким переходом до моделі сталого розвитку, що вимагає перебудови виробничих процесів та оновлення підходів до природокористування. Ключовим інструментом такої трансформації є впровадження екологічно безпечних технологій. Проте, попри декларативну підтримку «зеленого» курсу, на практиці реалізація

© Кричевська Д.А., Петровська М.А., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

еко-інноваційних рішень часто стикається з відсутністю чіткої методологічної бази та неузгодженістю понятійно-категоріального апарату. В українському науковому вжитку простежується паралельне використання термінів *технології захисту навколишнього середовища, екологічні технології*, *зелені технології*, *чисті технології* та *природоохоронні технології*. Відсутність чіткої делімітації цих понять ускладнює формування державної екологічної політики та розроблення цільових стандартів для різних галузей виробництва та природокористування. Водночас ігнорування системного підходу при впровадженні екологічних технологій може призводити до конфліктів. Наприклад, нехтування природоохоронним аспектом при впровадженні проектів будівництва вітрових електростанцій на природних та напівприродних полонинах Українських Карпат вже призводить до негативного ставлення громадян до розвитку альтернативної енергетики у цьому регіоні.

Актуальність дослідження. Існує потреба у концептуалізації поняття *екологічно безпечних технологій* як цілісних систем, що включають не лише обладнання, а й природоохоронні та управлінські рішення. Без ґрунтовної класифікації цих технологій за функціональним призначенням (від профілактики забруднення до адаптації до кліматичних змін) неможливо розробити ефективні стратегії циркулярної економіки та сталого розвитку регіонів. Систематизація екологічно безпечних технологій у сферах виробництва та природокористування є важливою для уніфікації понятійно-категоріального апарату в умовах активної євроінтеграції екологічної політики України.

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. Питання екологізації виробництва та природокористування є об'єктом уваги багатьох як вітчизняних, так і закордонних учених [1–4, 7, 8, 18–20]. Екологічні технології є предметом дослідження таких галузей прикладної екології, як техноекологія [8], промислова екологія [7], геоекологія [10], які успішно розвиваються в Україні. Проблемам визначення, оцінювання стану і перспектив розвитку екологічних технологій на глобальному й регіональному рівнях присвячені глосарії, дослідження та звіти Організації економічного співробітництва і розвитку (Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD)), Міжнародного енергетичного агентства (Internatinal Energy Agency (IEA)), Європейського агентства з охорони довкілля (European Environment Agency (EEA)), Програм ООН (зокрема, програми з довкілля UNEP). Зазначимо, що термін «екологічно безпечні технології» (Environmentally Sound Technologies), який є об'єктом нашого дослідження, закріплений у «Порядку денному на XXI століття». Дефініція понять у сфері захисту довкілля подається у глосаріях OECD [14, 15] та EEA [11, 12, 17], які створені для узгодження екологічної термінології у різних країнах.

Важливою в контексті нашого дослідження є публікації Р. Ван Беркеля та О. Мусіної [2, 19], у яких розглянуто еволюційний розвиток розуміння екологічних технологій: від технологій, що призначені лише для очистки викидів та скидів (технології «end-of-pipe») до інтегрованих систем, що сприяють сталому розвитку, спрямовані, зокрема, на відновлення екосистем та адаптацію до зміни клімату.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Попри значну кількість вітчизняних наукових праць, які присвячені різноманітним технологіям захисту навколишнього середовища, питання понятійно-категоріального апарату у сучасній прикладній екології та техноекології є недостатньо висвітленим. Потребують уваги підходи до класифікації екологічно безпечних технологій у виробничій сфері та сфері природокористування.

Новизна статті полягає у системному переосмисленні екологічних технологій не як окремих технічних рішень, а як цілісних систем, що включають не лише обладнання, а й природоохоронні та управлінські рішення. Вперше акцентовано на відмінностях між екологічно безпечними технологіями у виробничій сфері та у сфері природокористування. Виділено критерії їхнього порівняння: цільове призначення, об'єкт вивчення, ступінь інтеграції з природними ландшафтами, очікувані результати. Запропоновано підходи до класифікації екологічно безпечних технологій.

Методологічне або загальнонаукове значення полягає у концептуалізації поняття *екологічно безпечних технологій* як цілісних систем, що включають не лише технічні, але й природоохоронні та управлінські рішення. Таке розуміння екотехнологій, що охоплюють не лише виробничу сферу, але й сферу природокористування, є важливою для адаптації вітчизняного понятійно-категоріального апарату до міжнародних норм та забезпечення сталого розвитку суспільства.

Викладення основного матеріалу. У сучасному світі під *технологіями* розуміють способи й методи перетворення речовини або інформації для отримання певного результату – продукту, послуги, енергії тощо. Вони включають знання, інструменти та організаційні рішення, які забезпечують ефективність людської діяльності. Різноманітні технології застосовують на промислових підприємствах і в сільському господарстві, у військовій галузі, сфері послуг та побуті. На виробництві технологією

або технологічним процесом часто називають безпосередньо операції видобутку (отримання) сировини, її транспортування й переробки, що є основою виробничого процесу. Технічний контроль на виробництві теж є частиною технології. У побуті технологією називають опис процесів, інструкції із виконання різноманітної діяльності, технологічні вимоги та ін. Існують технології, орієнтовані не лише на створення матеріального продукту. Наприклад, сучасні *інформаційні технології* (ІТ) і телекомунікаційні технології (ТТ) створюють інформаційні продукти.

У Великому тлумачному словнику (ВТС) сучасної української мови наводять два визначення терміна *технології* [9]:

1) сукупність знань, відомостей про послідовність окремих виробничих операцій у процесі виробництва чого-небудь. Навчальний предмет, що викладає ці знання, відомості;

2) сукупність способів обробки або переробки матеріалів, виготовлення виробів, проведення різних виробничих операцій, надання послуг тощо.

Екологічні технології (екотехнології) у системі технологічних знань посідають окреме, міжгалузеве місце, оскільки їхнім завданням є не лише створення матеріальних благ для суспільства, а й збереження природних ресурсів та мінімізація негативного впливу антропогенної діяльності на середовище. Відповідно *екологічні технології* – це узагальнюючий термін, який охоплює технології, спрямовані на захист усіх компонентів довкілля, зменшення негативного впливу виробництва на природне середовище, раціональне ощадливе використання природних ресурсів. Прикладами таких технологій є системи очищення води, різноманітні методи зменшення викидів в атмосферу, енергозберігаючі технології та використання відновлюваних джерел енергії, сортування і переробка відходів, методи крапельного зрошення ґрунтів тощо. В англомовних джерелах цей термін близький до поняття *Environmental technologies* і зустрічається як в академічних, так і в науково-популярних джерелах [13]. Зауважимо, що дослівний переклад цього терміну означає «технології для охорони довкілля» або «довкіллєві технології».

Поряд з терміном *екологічні технології* у наукових і нормативних документах часто використовують такі поняття як *технології захисту навколишнього середовища (довкілля)*, (англ. – Environmental protection technologies / Integrated environmental protection technologies) [12, 17], *екологічно безпечні (дружні) технології* (Environmentally sound technologies (ESTs), *зелені технології* (Green technologies), *чисті технології* (Clean technologies / CleanTech) [11], *технології реагування на зміни довкілля* (Environmental response technologies), *природоорієнтовані рішення* (Nature-based solutions / NBS), які походять, передусім, із різноманітних міжнародних програм, спрямованих на розроблення, впровадження та забезпечення стратегій та напрямів сталого розвитку суспільства.

У науковому та освітньому середовищі України найбільш вживаним є поняття *технології захисту навколишнього середовища (довкілля)* (англ. – Environmental protection technologies). Цей термін слугує назвою однойменної освітньої спеціальності, об'єктом вивчення якої на магістерському рівні є «сучасні природоохоронні технології захисту навколишнього середовища та забезпечення екологічної безпеки» [6]. У термінологічному словнику Європейського агентства з навколишнього середовища (General Multiligual Environmental Thesaurus), словосполучення «Integrated environmental protection technologies» пояснюють як «технології, які відповідають меті охорони природи через те, що у своїй конструкції враховують екологічні принципи. Інтегровані стратегії контролю довкілля, реалізовані на ранніх технологічних стадіях на відміну від технологій, націлених на усунення вже заподіяної екологічної шкоди, у підсумку поліпшують технічні й економічні характеристики процесу. [17], до «Environmental protection technologies» відносять технології, розроблені на принципах запобігання забрудненню й відповідних екологічних нормативах [12].

У міжнародній екологічній політиці більш вживаним є термін *екологічно безпечні технології* (англ. Environmentally sound technologies (ESTs), який використовують установи ООН у своїй стратегічній документації, зокрема у Порядку денному на XXI століття (або англ. Agenda 21) – плану дій щодо сталого розвитку, прийнятого ООН на Міжнародній конференції з довкілля і розвитку в Ріо-де-Жанейро 1992 року. У словнику Glossary of Environment Statistics (United Nations, New York, 1997) поняття *Environmentally sound technologies* (ESTs) визначають як «техніка і технологія, здатні зменшити ступінь шкідливого впливу на навколишнє середовище шляхом використання процесів і матеріалів, у результаті використання яких утворюється менше потенційно забруднювальних середовище речовин, які здатні нейтралізувати ці речовини до їхнього скиду або утилізувати і повторно використати відходи виробництва. При оцінці подібних технологій потрібно враховувати суспільно-економічні та культурні умови, в яких відбувається впровадження» [14, 15]. Сьогодні суть цього поняття суттєво розширили. Відповідно до визначення Програми ООН з навколишнього середовища (UNEP), цей термін пояснюють так: «Екологічно безпечні технології – це технології, які мають потенціал для значного покращення екологічних показників порівняно з іншими технологіями. Вони захищають довкілля, менше забруднюють навколишнє середовище, використовують ресурси сталим чином, переробляють більше своїх відходів і продуктів, а також обробляють усі залишкові відходи більш екологічно прийнятним

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

способом. Екологічно безпечні технології – це не просто окремі технології. Їх можна визначити як цілісні системи, що включають ноу-хау, процедури, товари та послуги, обладнання, а також організаційні та управлінські процедури для сприяння екологічній стійкості [16].

Класифікація *екологічно безпечних технологій* (ЕБТ) залежить від їхнього функціонального призначення, галузі застосування та способів реалізації. Рене Ван Беркель 2008 року запропонував групувати такі технології за їхніми спроможностями ефективно використовувати природні ресурси та зберігати довкілля. Він виділив шість груп технологій: спрямовані на боротьбу з викидами, профілактику, заміщення, зберігання, відновлення, адаптацію (табл. 1). На думку автора ця класифікація віддзеркалює еволюцію екологічно безпечних технологій: від першої генерації «технологій кінця труби» (end-of-pipe), що спрямовані на ліквідацію викидів і скидів, до другої – «технології профілактики», які зменшують екологічні наслідки, підвищують ефективність виробництва, і до третьої – «екологічно сталих технологій», що системно інтегровані в економіку з метою забезпечення усіх аспектів сталого розвитку (економічних, екологічних і соціальних) [2, 19].

На нашу думку, перші три групи екологічно безпечних технологій, зазначених у табл. 1, передусім притаманні для виробничої сфери, а ті, що спрямовані на зберігання, відновлення та адаптацію – до екотехнологій, які використовують у сфері природокористування. Між ними є ряд відмінностей, продемонстрованих у табл. 2. Зокрема, за цільовим призначенням ЕБТ у виробництві спрямовані, передусім, на зменшення негативного впливу виробничих процесів на довкілля та оптимізацію техногенних процесів. Натомість першочерговою метою ЕБТ у сфері природокористування є раціональне використання природних ресурсів, збереження та відновлення екосистем.

Екологічно безпечні технології (ЕБТ) *у виробництві* є системою технічних, організаційних та управлінських рішень, спрямованих на мінімізацію негативного впливу промислових підприємств на довкілля та раціональне використання природних ресурсів у процесі виробництва продукції. Класифікувати такі технології пропонуємо за різними критеріями залежно від сфери і напряму використання, рівня інноваційності та масштабу впровадження.

Так, *за сферою виробництва* вирізняють ЕБТ, що використовують у металургії, хімічній промисловості, будівництві, енергетиці, харчовій промисловості, комунально-побутовій сфері, транспорті тощо.

За способом використання ресурсів ЕБТ бувають ресурсозберігаючими, ресурсовідновними, безвідходними. До ресурсозберігаючих відносять такі, які при виробництві призводять до зменшення витрат сировини, енергії та води (наприклад, повторне вико-

Таблиця 1

Групування екологічно безпечних технологій за способами вирішення екологічних проблем [2, 19]

Технології	Функціональне призначення
Спрямовані на боротьбу з викидами	Мінімізація накопичення забруднювальних речовин впродовж усього циклу виробництва і споживання (збирання забруднювальних речовин та їхня нейтралізація, поглинання двооксиду Карбону тощо). Боротьба зі скидами забруднювальних речовин і / або відходами у кінцевій стадії процесу виробництва (або споживання).
Профілактика	Спрямовані на скорочення неефективності, а отже, зменшення втрат матеріалів, енергії та води (енергоефективне освітлення і двигуни, економічні автомобілі та більш чисті технології процесу). Запобігання або мінімізація накопичення забруднювальних речовин впродовж усього циклу виробництва і споживання.
Заміщення	Спрямовані на введення відновлюваних ресурсів (фотоелектричні системи, вітряки, виробництво біопалива), задіяні у допоміжному процесі або через заміщення вхідних матеріалів. Заміщення відновлюваними матеріалами невідновлюваних ресурсів для виробництва і споживання, зокрема джерел енергії.
Зберігання	«М'які» технології, що зберігають природу та екосистеми. Охоплюють методи управління водозбірними басейнами, лісами, водно-болотними угіддями тощо. Збереження природи та екосистем у такий спосіб, щоб вони залишалися «здоровими», характеризувалися високим рівнем біорозмаїття, продуктивними і стабільними.
Відновлення	Спрямовані на фізичне і хімічне очищення (рекультивація земель, локалізація розливу нафти та її видалення), реабілітацію інфраструктури (відновлення шахт та інфраструктури поселень). Відновлення знищених екосистем з метою зупинення або відвернення тенденції погіршення стану навколишнього середовища.
Адаптація	Пристосування до змін клімату (управління прибережними зонами, виведення нових сільськогосподарських сортів), до виснаження озонового шару (посилення опору до ультрафіолетових променів покриттів, пластмас, одягу), до засолення ґрунту (інтегровані системи землеробства тощо). Адаптація процесів і систем виробництва та споживання до очікуваних незворотних змін у навколишньому середовищі.

Таблиця 2

Відмінності в екологічно безпечних технологіях (ЕБТ), які використовують у виробництві та природокористуванні

Критерій	Екологічно безпечні технології у виробництві	Екологічно безпечні технології у природокористуванні
Цільове призначення	Зменшення негативного впливу виробничих процесів на довкілля, оптимізація техногенних процесів	Раціональне використання природних ресурсів, збереження екосистем
Об'єкт вивчення	Технологічні процеси, обладнання, матеріали	Природні ландшафти, надра, земельні, водні, кліматичні та біологічні ресурси
Інтеграція з природою	Помірна	Висока
Очікуваний результат	Зниження забруднення та економія ресурсів	Збереження або відновлення природних ресурсів та екосистем
Приклади технологій	Заміна токсичних реагентів, газоочисні установки, сорбційні фільтри для очищення води, замкнені цикли виробництва, технології переробки пластику	Фітоочищення води, системи крапельного зрошення, фіторемедіація ґрунтів, зелені дахи та стіни у містах, екодуки для збереження міграційних шляхів фауни

ристання технологічної води, автоматизація процесів для економії енергії). Ресурсовідновні характеризуються використанням відновлюваних матеріалів або відновлення ресурсів після виробництва (переробка і повторне використання металів, паперу, скла, пластику). Безвідходні технології передбачають організацію замкнених циклів виробництва, де відходи стають сировиною для інших процесів (наприклад, виробництво біопластику з біологічно розкладної сировини).

За способами очищення довкілля їх поділяють на технології, які: запобігають забрудненню (утворенню шкідливих викидів і відходів) ще на етапі виробництва (наприклад, заміна токсичних реагентів на безпечні, оптимізація процесів для зменшення відходів); мінімізують забруднення (фільтрувальні установки, нейтралізація хімічних стоків, технології сортування відходів); технології відновлення (рекультивація промислових земель, переробка шлаків і промислових відходів).

За *технологічним рівнем* розрізняють традиційні та інноваційні технології. Традиційні використовують тривалий час і мають доведену ефективність. До таких, наприклад, можна віднести механічні фільтри, технології компостування, відстоювання стічних вод тощо. Інноваційні екологічні технології – це нові або радикально вдосконалені технологічні рішення, які поєднують у собі високий рівень наукових досягнень та екологічну ефективність. Їхня головна особливість – застосування найсучасніших досягнень науки і техніки для вирішення екологічних проблем [1, 3, 5]. Прикладами таких технологічних рішень є: нанотехнології для очищення води; вуглецеві уловлювачі та системи зберігання CO_2; біотехнології для утилізації відходів і виробництва біопалива; технології 3D-друку у будівництві, інтелектуальні «розумні мережі» (Smart Grids) для ефективного використання енергії тощо.

Поняття інноваційних екологічних технологій є близьким до поняття *зелені технології*, яке активно використовують у політиці, бізнесі та науково-популярній сфері починаючи з 2000-х років. В Україні у наукову сферу цей термін увійшов у 2010-х роках, що пов'язано з євроінтеграційними процесами в екологічній політиці країни. Зелені технології охоплюють широкий спектр продуктів, послуг та практик, що підтримують більш стале майбутнє та боротьбу зі зміною клімату. Розробники таких технологій використовують наукові знання та інновації, щоб допомогти зберегти природні ресурси, зменшити викиди парникових газів та сприяти використанню відновлюваних джерел енергії [1, 2, 4, 20]. У структурі зелених технологій вирізняють *чисті, кліматичні, зелені IT технології. Чисті технології* (Clean technology) стосуються, зокрема, продуктів, послуг або процесів, які використовують менше ресурсів і мають мінімальний вплив на навколишнє середовище порівняно з традиційними технологіями. *Кліматичні технології* (Climate technology) зосереджені на пом'якшенні наслідків зміни клімату або адаптації до них. Вони включають розробки, що зменшують викиди парникових газів, покращують поглинання вуглецю або допомагають суспільствам адаптуватися до наслідків зміни клімату. *Зелені IT (green IT)* стосуються технологій та практик, які зменшують вплив на навколишнє середовище сектора інформаційних технологій. Іноді їх називають сталими IT. До зелених IT зачислено енергоефективні комп'ютери або центри обробки даних [20].

За *масштабом впровадження* ЕБТ у виробництві поділяють на локальні (на рівні одного підприємства, країни), регіональні та глобальні.

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

Загалом на більшості промислових виробництв ЕБТ можуть бути застосовані за такими напрямами: підвищення енергоефективності (модернізація двигунів, впровадження систем автоматичного регулювання енергопотоків, застосування відновлюваних джерел енергії), застосування безвідходних та маловідходних технології, водоощадних технологій (очищення та повторне використання води у технологічних процесах), технологій мінімізації шкідливих викидів (застосування фільтраційних систем, каталітичних нейтралізаторів, газоочисних установок), ресурсозбереження (використання вторинної сировини, цифровізація процесів). Застосування ЕБТ технологій у виробничій сфері дозволяє поєднати економічні інтереси підприємств із соціальною відповідальністю. Вони сприяють підвищенню конкурентоспроможності продукції, зменшенню витрат на ліквідацію екологічних наслідків, а також покращують якість життя населення.

Екологічно безпечні технології у природокористуванні охоплюють сукупність технічних, природоохоронних (з акцентом на збереженні біорозмаїття) і організаційних рішень, спрямованих на зменшення негативного антропогенного впливу на природу, збереження та ощадливе використання ресурсів, відновлення порушених екосистем. Вони орієнтовані на гармонізацію взаємодії людини з природою, часто базуються на природних механізмах – наприклад, на використанні рослин для очищення води або штучному створенні природоохоронних територій (ботанічних садів, зоопарків, дендропарків) та зеленої інфраструктури (облаштування зелених дахів, вертикального озеленення, дощових садів). Впровадження ЕБТ у природокористуванні дозволяє зменшити екологічні ризики; підвищити ефективність використання ресурсів; забезпечити екологічну безпеку територій; сприяти збереженню біорозмаїття; формувати екологічну свідомість у суспільстві.

Екологічно безпечні технології у природокористуванні пропонуємо класифікувати за такими критеріями: за *напрямами природокористування* та за *функціональним призначенням.*

Залежно від *напрямів природокористування* змінюються і види технологій. Так для водокористування прикладами ЕБТ є технології крапельного зрошення, технології збору і повторного використання дощової води (Rainwater harvesting), конструйовані біоплато (Constructed Wetlands). Для надрокористування – екологічно безпечні методи видобутку корисних копалин, реабілітація кар'єрів і шахт. Для землекористування (аграрного сектору) – органічне та точне землеробство, агролісівництво, новітні технології обробітку ґрунту (No-Till, Strip-Till) тощо. Для лісокористування – селективна вирубка, технології лісовідновлення, дистанційний моніторинг стану лісів. Для рекреаційного та заповідного (природоохоронного) природокористування – технології облаштування туристичних притулків та стежок, розширення або створення природоохоронних територій, технології збереження видів і популяцій (наприклад, реакліматизація, ревайлдінг, проектування екопереходів для міграцій фауни).

За *функціональним призначенням* ЕБТ у природокористуванні поділяють на захисні, відновлювальні, ресурсозберігаючі, моніторингові**.** Захисні технології запобігають негативним антропогенним впливам на природне середовище. До таких відносять шумозахисні екрани, берегоукріплювальні споруди, вітрозахисні насадження, екопереходи для міграції тварин тощо. Відновлювальні технології сприяють реабілітації екосистем. Прикладами таких технологій є біоремедіація, ландшафтна реконструкція, ревайлдінг тощо. Ресурсозберігаючі технології забезпечують ефективне використання ресурсів (крапельне зрошення, збір дощової води). Моніторингові технології дозволяють контролювати стан довкілля (датчики якості повітря, води, ґрунтів, GPS моніторинг фауни та фотопастки).

Отож, сучасні екологічно безпечні технології охоплюють дуже широкий спектр методів захисту довкілля, а проблематика їхньої систематизації і класифікації потребує подальшого вивчення.

Головні висновки. У статті проаналізовано етимологію поняття «екологічно безпечні технології» (англ. – Environmentally Sound Technologies – ESTs), яке, на нашу думку, є більш комплексним і системним, у порівнянні з поняттям «технології захисту навколишнього середовища». Простежено еволюцію поняття та запропоновано підходи до класифікації екологічно безпечних технологій у виробництві та природокористуванні. Таке концептуальне бачення екотехнологій дозволить більш ефективно адаптувати вітчизняний понятійно-категоріальний апарат до міжнародних та європейських стандартів.

Перспективи використання результатів дослідження охоплюють теоретичну, освітню та нормативну сфери. Поняття «екологічно безпечні технології» та їхня класифікація можуть бути використані органами державної влади з метою гармонізації українських екологічних стандартів із Директивами ЄС щодо циркулярної економіки та із Європейським зеленим курсом. Систематизований матеріал статті є цінним ресурсом для підготовки лекцій, навчальних посібників, оновлення навчальних програм у вищій школі.

Література

1. Зелені технології, інновації та інтелектуальна власність. Київ : УКРНОІВІ, 2024. URL: https://nipo.gov.ua/wp-content/uploads/2024/05/Report_Green_Tech_Innovations_IP_web.pdf (дата звернення: 24.03.2026).

2. Мусіна Л. А. Зелені технології й інновації як рушій економічного зростання: державна політика і перспективи розвитку. *Науково-технічна інформація*. 2012. № 4. С. 22–28. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/NTI_2012_4_7 (дата звернення: 24.03.2026).
3. Нагієва А. І. Г., Зайченко М. Екологічні інновації: підтримка сталого розвитку процесів, продуктів та послуг. *Економіка та суспільство*. 2022. № 46. DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-46-37.
4. Основні засади впровадження моделі «зеленої» економіки в Україні : навч. посіб. / Т. П. Галушкіна та ін. ; за наук. ред. Т. П. Галушкіної. Київ : Інститут екологічного управління та збалансованого природокористування, 2017. 154 с.
5. Про інноваційну діяльність : Закон України від 04.07.2002 № 40-IV. *Відомості Верховної Ради України*. 2002. № 36. Ст. 266. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/40-15#Text (дата звернення: 24.03.2026).
6. Стандарт вищої освіти України: другий (магістерський) рівень, галузь знань 18 – Виробництво та технології, спеціальність 183 «Технології захисту навколишнього середовища» : затв. наказом МОН України від 04.03.2020 № 378. URL: https://osvita.ua/doc/files/news/718/71882/183-technology-zachisty-seredovisa-M.pdf (дата звернення: 24.03.2026).
7. Сторожук В. М., Батлук В. А., Назарук М. М. Промислова екологія : підручник. Львів : Українська академія друкарства, 2006. 574 с.
8. Техноекологія : підручник / М. С. Мальований та ін. ; за ред. М. С. Мальованого. Львів : Національний університет «Львівська політехніка», 2013. 424 с.
9. Технологія. *Великий тлумачний словник сучасної української мови : 250000* / уклад. і голов. ред. В. Т. Бусел. Київ ; Ірпінь : Перун, 2005. С. 1448–1728. URL: http://irbis-nbuv.gov.ua/ulib/item/UKR0000989 (дата звернення: 24.03.2026).
10. Шищенко П. Г., Гавриленко О. П. Прикладна геоекологія : підручник. Київ : ПВТП «LAT&K», 2020. 440 с.
11. Clean technology. *European Environment Agency (GEMET)*. URL: https://www.eionet.europa.eu/gemet/en/concept/1460 (дата звернення: 27.03.2026).
12. Environmental protection technology. *European Environment Agency (GEMET)*. URL: https://www.eionet.europa.eu/gemet/en/concept/2910 (дата звернення: 27.03.2026).
13. Environmental technology. *Wikipedia*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Environmental_technology (дата звернення: 27.03.2026).
14. Environmentally sound technologies (ESTs). *Glossary of Environment Statistics. Studies in Methods*. Series F, No. 67. New York : United Nations, 1997.
15. Environmentally sound technologies (ESTs). *OECD glossary of statistical terms* / Organisation for Economic Co-operation and Development. Paris : OECD Publishing, 2008. URL: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2008/09/oecd-glossary-of-statistical-terms_g1gh9ad7/9789264055087-en.pdf (дата звернення: 27.03.2026).
16. Environmentally Sound Technologies. *United Nations Environment Programme*. URL: https://www.unep.org/regions/asia-and-pacific/regional-initiatives/supporting-resource-efficiency/environmentally-sound (дата звернення: 27.03.2026).
17. Integrated environmental protection technology. *European Environment Agency (GEMET)*. URL: https://www.eionet.europa.eu/gemet/en/concept/4382 (дата звернення: 27.03.2026).
18. Kumar R., Nanda A. H. G., Sharma P. Environmentally sound technologies for sustainability and climate change. *Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals. Partnerships for the Goals*. Cham : Springer Nature Switzerland AG, 2020. P. 1–11. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-71067-9_27-1.
19. Van Berkel R. Regional study to guide policy interventions for enhancing the development and transfer of publicly-funded environmentally sound technologies in Asia and Pacific region. 2008. P. 5–7.
20. What is green technology? *IBM*. URL: https://www.ibm.com/think/topics/green-technology (дата звернення: 27.03.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 01.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 662.4:539.1:543.42
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.33

ГАММА-ВИПРОМІНЮВАННЯ У ВИЯВЛЕННІ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ РЕЧОВИН

Машиністов В.Е., Балакін В.Ф., Рак П.В., Соловйова І.А., Николаєнко Ю.М.
Навчально-науковий інститут «Дніпровський металургійний інститут»
Українського державного університету науки і технологій
пр. Науки, 4, 49000, м. Дніпро
viktormashinistov3@gmail.com

У статті розглянуто можливості застосування гамма-випромінювання для виявлення вибухонебезпечних речовин і предметів, зокрема мін. Узагальнено результати попередніх досліджень, присвячених використанню гамма-випромінювання для дистанційного виявлення неоднорідностей у середовищі. Розглянуто фізичні основи взаємодії гамма-квантів із речовиною, включаючи комптонівське розсіювання, фотоефект. Особливу увагу приділено методу зворотного розсіювання як найбільш перспективному для задач виявлення вибухонебезпечних речовин. Проведено аналіз спектральних характеристик випромінювання та їх зв'язку з хімічним складом речовин. Показано, що використання джерел типу Co-60 дозволяє отримувати інформацію про структуру середовища та виявляти приховані об'єкти. Запропонований підхід базується на опроміненні досліджуваного об'єкта гамма-випромінюванням та реєстрації зворотно розсіяного сигналу за допомогою багатоканального спектрометра. Фізичною основою методу є процеси взаємодії гамма-квантів із речовиною, насамперед комптонівське розсіювання, а також фотоефект, що можуть супроводжуватися характеристичним випромінюванням. При взаємодії випромінювання з речовиною формується енергетичний спектр, який містить інформацію про її елементний склад. Особливий інтерес становлять спектральні лінії, що відповідають таким елементам, як вуглець (C), азот (N) та кисень (O), які є основними компонентами більшості вибухових речовин. Ключовою ідеєю методу є виявлення аномально підвищеного рівня сигналів, що відповідають зазначеним елементам, у спектрі зворотно розсіяного випромінювання. Така аномалія інтерпретується як індикатор можливого наявності вибухонебезпечної речовини. Визначено переваги, обмеження та перспективи використання гамма-спектру зворотного розсіяного сигналу для виявлення, ідентифікації та локалізації вибухонебезпечних речовин. Використання гамма-випромінювання для виявлення вибухонебезпечних речовин дозволить досліджувати значні території за відносно невеликий проміжок часу при його прийнятних масогабаритних характеристиках. В цілому пристрої, які можуть бути розроблені з використанням гамма-випромінювання, можуть повністю відповідати вимогам, які пред'явлені ООН (International Standards for Humanintarian Mine Clearance Operations/-UN-1996). *Ключові слова:* гамма-випромінювання, речовини, зворотне розсіювання, гамма-спектрометрія, детектування.

Gamma radiation in the detection of explosive substances. Mashinistov V., Balakin V., Rak P., Solovyova I., Nikolayenko Yu.
The article examines the possibility of stagnant gamma-vipromining for identifying unsafe speeches and objects, including min. The results of previous studies devoted to the use of gamma-vipromotion for remote detection of inhomogeneities in the medium have been confirmed. The physical basis of the interaction of gamma quanta with speech, including Compton dispersion and the photo effect, is examined. Particular respect is given to the method of gate dissection as the most promising for the task of identifying faulty speech. An analysis of the spectral characteristics of vibration and their connection with the chemical storage of resins was carried out. It has been shown that a vicoristic device of the Co-60 type allows one to retrieve information about the structure of the core and detect the presence of objects. The identification of the approach is based on the evaluation of the target object, gamma-ray prominence and registration of the return scattered signal using an additional multi-channel spectrometer. The physical basis of the method is the process of interaction of gamma quanta with speech, firstly Compton scattering, as well as a photographic effect that can be accompanied by characteristic vibration effects. With the interaction of vibration with speech, an energy spectrum is formed that contains information about its elemental storage. It is of particular interest to determine the spectral lines that correspond to such elements as carbon (C), nitrogen (N) and acidity (O), which are the main components of most vibukhic acids. The key idea of the method is the identification of an abnormally elevated level of signals that correspond to the designated elements in the spectrum of reversal scattering. This anomaly is interpreted as an indicator of the possible manifestation of a disordered speech disorder. The advantages, boundaries and prospects of using the gamma spectrum of the gateway Russian signal for the detection, identification and localization of unsafe speeches have been identified. The use of gamma-viprominuing for the identification of unsafe speeches allows one to trace significant territories in a relatively short period of time with very favorable mass and dimensional characteristics. In general, the devices that can be separated from the vicors of gamma-viprominuvaniya can closely resemble the effects presented by the UN (International Standards for Humanitarian Mine Clearance Operations/-UN-1996). *Key words:* gamma-vipromining, speech, portal dispersion, gamma spectrometry, detection.

Постановка проблеми. Сучасні виклики у сфері техногенної та екологічної безпеки зумовлюють необхідність створення ефективних методів дистанційного виявлення вибухонебезпечних речовин (ВНР), зокрема у контейнерах, транспортних засобах та ґрунтовому середовищі. Особливої актуальності ця проблема набула в умовах значного мінного забруднення територій.

© Машиністов В.Е., Балакін В.Ф., Рак П.В., Соловйова І.А., Николаєнко Ю.М., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Існуючі методи виявлення вибухових речовин мають низку обмежень, пов'язаних із недостатньою селективністю, складністю реалізації, трудомісткістю, невисоким темпом пошуку та, головне, недостатньо безпечні. У зв'язку з цим виникає необхідність розробки нових фізичних підходів, здатних забезпечити одночасно дистанційність, інформативність і надійність ідентифікації, високий рівень безпеки виконання пошукових робіт.

Проблема виявлення вибухонебезпечних речовин (ВНР) є однією з ключових у сфері національної безпеки, цивільного захисту та протимінної діяльності. Особливої актуальності ця задача набула в Україні в умовах значного забруднення територій вибухонебезпечними об'єктами, що створює загрозу для населення, інфраструктури та економічної діяльності.

Особливе місце серед відомих методів займає гамма-випромінювання завдяки своїй високій проникній здатності та можливості взаємодії з речовиною на атомному рівні. Це дозволяє не лише виявляти приховані об'єкти, але й отримувати інформацію про їх внутрішню структуру та елементний склад. Зокрема, методи гамма-радіографії, зворотного розсіювання та гамма-активаційного аналізу широко застосовуються для контролю вантажів, огляду транспортних засобів і виявлення вибухових пристроїв.

Водночас використання гамма-методів пов'язане з низкою технічних труднощів, зокрема необхідністю застосування джерел іонізуючого випромінювання та складністю обробки спектрометричних даних.

Актуальність дослідження. Актуальність роботи обумовлена необхідністю розробки ефективних методів очищення територій від мін, що є важливою складовою екологічної безпеки. Використання гамма-випромінювання дозволяє здійснювати дистанційний аналіз складу ґрунту та виявляти сторонні об'єкти за їх спектральними характеристиками.

Зв'язок роботи з науковими та практичними завданнями. Робота пов'язана з вирішенням задач у напрямах:

- екологічної безпеки територій;
- неруйнівного контролю;
- радіаційної фізики та спектрометрії.

Практичне значення полягає у створенні передумов для розробки нових засобів гуманітарного розмінування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні відомі публікації, наприклад, [1-3], в яких приводяться результати досліджень по розробці засобів і методів виявлення ВНР. Однак існуючі методи потребують подальшого розвитку, зокрема у напрямі підвищення точності, інформативності методів. Метою даної роботи є аналіз можливостей застосування гамма-випромінювання для виявлення вибухонебезпечних речовин, дослідження фізичних основ методу та визначення перспектив його подальшого розвитку.

Виділення невирішених частин проблеми. Недостатньо дослідженими залишаються:

- можливості використання розсіяного гамма-випромінювання;
- вплив властивостей навколишнього середовища на точність виявлення, ідентифікації та локалізації ВНР;
- параметри джерел випромінювання.

Наукова новизна. Наукова новизна роботи полягає у наступному:

- вперше запропоновано підхід до виявлення ВНР, що базується на аналізі спектрального складу зворотно розсіяного гамма-випромінювання з акцентом на виявленні елементів C, N, O;
- удосконалено метод використання зворотного розсіювання шляхом переходу від інтегральної оцінки сигналу до спектрометричного аналізу;
- набув подальшого розвитку підхід до дистанційної ідентифікації матеріалів на основі їх елементного складу.

Методологічне значення. Методологічне значення роботи полягає у розширенні можливостей гамма-спектрометричних методів для задач ідентифікації складних багатокомпонентних середовищ.

Запропонований підхід поєднує:

- фізику взаємодії випромінювання з речовиною;
- методи спектрального аналізу;
- принципи дистанційного зондування.

Загальнонаукове значення полягає у демонстрації можливості використання спектральних характеристик зворотно розсіяного випромінювання як інформативного параметра для визначення хімічного складу об'єктів.

Основний матеріал. З метою забезпечення надійного, безпечного і швидкого виявлення мін під поверхнею землі пропонується технічне рішення, що базується на опроміненні ділянки території, яка досліджується на предмет наявності мін, гамма-випромінюванням. Це електромагнітне коливання, яке випромінюється ядрами атомів при їх радіоактивних перетворюваннях у вигляді високоенергетичних квантів, має високу проникаючу здатність. Зокрема, товщина шару половинного ослаблення гамма-випромінювання в ґрунті складає 10-14 см.

Вся енергія гамма-випромінювання поглинається речовиною, в якій воно поширюється, шляхом іонізації її атомів. Встановлено, що в середньому на один акт іонізації витрачається енергія гамма-випромінювання в 33,85 електрон-Вольт. Саме вказана властивість поширення гамма-випромінювання в речовині створює умови для реалізації способу виявлення ВНР, причому за допомогою відомих технічних засобів Для вирішення задач сформульованих в рамках підходу, що пропонується, до виявлення вибухонебезпечних речовин і, зокрема, мін, передбачається використовувати гамма-випромінювання з енергією, яка не перевищує значення 2 МеВ. В цьому діапа-

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

зоні енергій основними процесами, що супроводжують поширення гамма-випромінювання в речовині, є фотоефект і ефект Комптона.

При фотоефекті має місце повне поглинання гамма-кванту, в результаті чого зв'язаний електрон атому вивільнюється і вся енергія гамма-кванту перетворюється в кінетичну енергію фотоелектрону.

Ефект Комптона - це процес розсіювання гамма-квантів на вільних електронах речовини і на електронах зовнішньої оболонки атому. В результаті цього гамма-квант передає електрону енергію E_e, яка є частиною від енергії Eγ і електрон покидає атом, а гамма-квант Eγ'=Eγ-E_e зі зменшеною енергією поширюється далі, змінивши напрям свого руху на кут θ між напрямом руху падаючого і розсіяного гамма-кванту. В подальшому розсіяний гамма-квант може таким же чином послідовно взаємодіяти з іншими атомами речовини, в якій він поширюється. якщо його енергії буде достатньо для вибивання електрону із атому. Загалом при опроміненні речовини гамма-квантами з енергією порядку 1 МеВ, в середньому може бути десятки тисяч таких взаємодій. При кожній із них із атомів речовини вторинного джерела електромагнітних коливань вибивається електрон, змінюється напрям руху налітаючого гамма-кванту та зменшується його енергія.

Суть підходу, що пропонується, ілюструється за допомогою рис. 1. Ділянка земної поверхні опромінюється моноенергетичним первинним джерелом гамма-квантами з енергією Eγ. В результаті багатократної взаємодії з атомами речовини ґрунту, в ньому відтворюється вторинне об'ємне джерело гамма-випромінювання великого об'єму, спектр якого є суцільним, від енергії Eγ до 0. Вторинне випромінювання, на відміну від первинного, розсіюється рівномірно у всіх напрямках, в тому числі і в зворотному (θ=180°). Атоми речовини, в якій поширюються гамма-кванти, поглинають і практично зразу випромінюють енергію строго певного значення Ее для кожного із них. Це створює умови для визначення кількісного і якісного хімічного складу даної речовини. Описані процеси відображаються у вигляді спектру енергії розсіяного гамма-випромінювання, вимірюючи і аналізуючи який, можна здійснювати пошук, локалізацію і ідентифікацію об'єктів з відомими фізичними та хімічними властивостями.

Так, коли опромінюється ґрунт, в якому знаходиться об'єкт, наприклад, міна, який має фізико-хімічні характеристики, які відмінні від характеристик навколишнього середовища, то він буде мати суттєво інший спектр гамма-випромінювання, ніж ґрунт. Цю властивість і пропонується використовувати для виявлення мін. Детектор (скануючий гамма-спектрометр) розміщується поряд із первинним джерелом, щоб запобігти попаданню в детектор прямого випромінювання від первинного джерела. Одержаний гамма-спектр зворотного розсіяного сигналу порівнюється із гамма-спектром випромінювання відомих мін, на підставі чого приймається рішення про відсутність або наявність міни на території, що обслідується.

Для оцінки можливості використання підходу, що пропонується для виявлення мін, був проведений експеримент. Відомо, що в калійному добриві міститься радіоактивний ізотоп калій-40 в 0,012% кількості його маси. Цим джерелом опромінювались суміші різних речовин, якими заповнювалась верхня третина проби. Гамма-спектрометр розміщувався на поверхні проби.

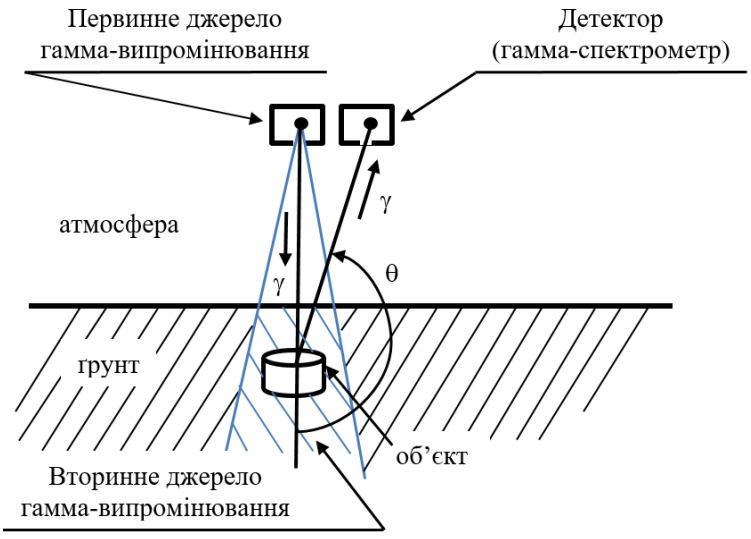


Рис. 1. Геометрія виявлення об'єктів в ґрунті

Деякі результати експериментів приведені на рис. 2, на якому показана якісна залежність кількості гамма-квантів, що потрапляють в канали спектрометра (ось Y) від енергії гамма- квантів, що випромінювались вторинним джерелом (ось X). Досліджувались калій і азот в складі відповідних добрив. Об'єкт-це імітатор вибухонебезпечних речовин, в склад яких, крім азоту, обов'язково входить вуглець (графіт). В експерименті використовувалась суміш саме цих елементів.

Із рис.2 видно, що для різних сумішей вид отриманих спектрограм різний. Зокрема, вони відрізняються видом і рівнем пагорбів і впадин на приведених залежностях. Таким чином, можна сподіватись, що пропонований підхід може використовуватися для виявлення мін. Тому потрібно і далі проводити дослідження в цьому напрямі, Тим більше, що для цього не потрібно вкладати значні кошти, При позитивних результатах це дасть можливість сформулювати вимоги до кон-

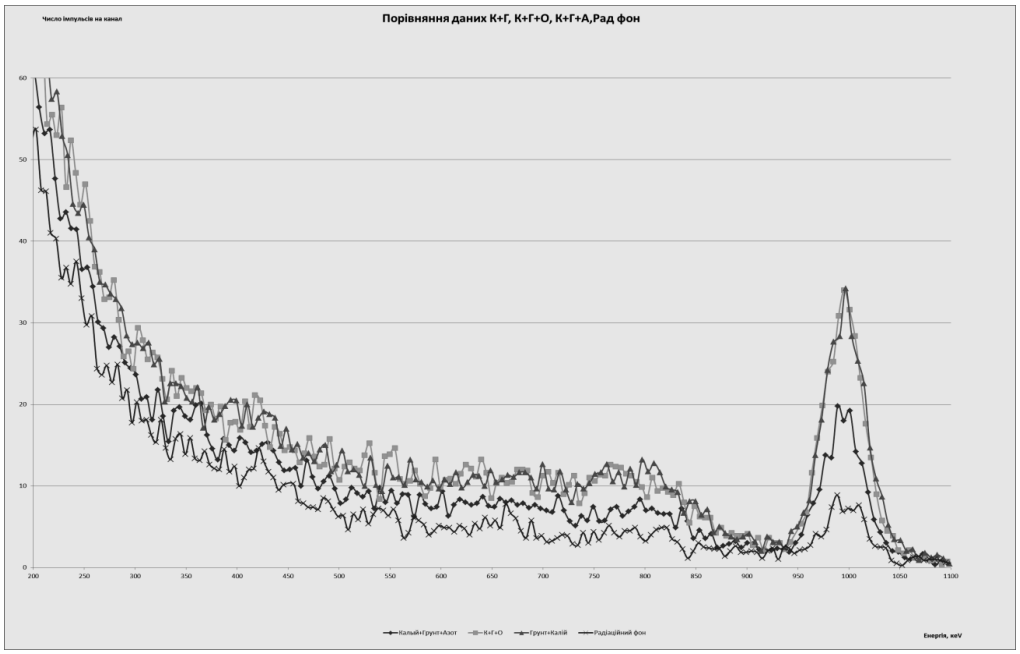


Рис. 2. Гамма-спектрограми (якісна залежність)

кретних технічних засобів для виявлення мін, що може допомогти вирішити глобальну проблему очищення територій від них.

Результати експерименту показали, що в принципі можливо використовувати розсіяне гамма-випромінювання для виявлення та локалізації мін.

В подальшому необхідно провести натурні експерименти з використанням джерел гамма-випромінювання як на імітаторах мін, так і на їх реальних зразках. Також необхідно виявити можливості даного підходу в залежності від властивостей грунту та об'єктів, що знаходяться в них, характеристик джерела опромінення, а також по часу пошуку та точності виявлення їх місцезнаходження. Це дасть можливість сформулювати шляхи конкретних інженерних розробок, виходячи із фізико-технічних вимог та забезпечення потрібного рівня надійності пошуку мін та його безпечності.

Оцінки показують, що для отримання енергії гамма-випромінювання, достатньої для використання її в якості зондуючого сигналу при пошуку мін, достатньо маси радіонуклідів в декілька десятків міліграм.

Пристрій, в якому може бути реалізований запропонований підхід, складається з джерела, що генерує зондуюче гамма-випромінювання і яке має локальну систему радіаційного захисту, коліматор, який формує пучок гамма-квантів та скануючий гамма-спектрометр, який приймає зворотній сигнал у вигляді спектру електромагнітного випромінювання. На підставі аналізу спектральних характеристик робиться висновок щодо виявлення та ідентифікації мін. Завдяки скануванню поверхні, що досліджується, з частотою, наприклад, 50 Гц, створюються умови для отримання одного її енергетичного зображення за час не більш ніж 20 мсек.

Висновки. В результаті проведених досліджень:

1. Запропоновано ефективний метод виявлення мін.
2. Підтверджено можливість використання гамма-випромінювання для ідентифікації об'єктів.
3. Метод забезпечує підвищення рівня безпеки та продуктивності пошукових робіт.

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

Використання гамма-випромінювання для виявлення вибухонебезпечних речовин дозволить досліджувати значні території за відносно невеликий проміжок часу при його прийнятних масогабаритних характеристиках. В цілому пристрої, які можуть бути розроблені з використанням гамма-випромінювання, можуть повністю відповідати вимогам, які пред'явлені ООН (International Standards for Humanintarian Mine Clearance Operations/-UN-1996).

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження доцільно спрямувати на:

- проведення натурних випробувань;
- розробку промислових зразків обладнання;
- підвищення точності методу.

Література

1. Іваненко О. В., Петренко М. С. Методи виявлення вибухонебезпечних предметів у ґрунті. Технічні науки та технології. 2024. № 2. С. 45–52.
2. Коваленко Д. П., Шевченко І. Л. Система виявлення вибухонебезпечних об'єктів на основі безпілотних літальних апаратів. Інформаційні технології і системи безпеки. 2022. № 3. С. 106–115.
3. Перспективні технології та методики пошуку вибухонебезпечних матеріалів. Карпов А., Кустов М., Басманов О., Кулаков О. 2024 рік: матеріали конференції «Проблеми надзвичайних ситуацій». Харків: НУ ЦЗУ. 2024.С. 183-184.

Дата першого надходження статті до видання: 30.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 504.61:911.375.1](045)
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.34

УРБОЕКОЛОГІЧНІ ТРАНСФОРМАЦІЇ ПРИРОДНИХ РЕСУРСІВ КІРОВОГРАДСЬКОЇ ОБЛАСТІ

Подзерей Р.В.
Уманський національний університет
вул. Садова 2, 20300, м. Умань
podzerej81@gmail.com

У статті проведено комплексне дослідження процесів урбоекологічної трансформації природно-ресурсного потенціалу Кіровоградської області в умовах інтенсивного антропогенного та техногенного навантаження. Актуальність теми зумовлена специфікою регіону, де поєднуються потужний агропромисловий сектор та унікальна мінерально-сировинна база, що створює критичні навантаження на довкілля.

У роботі проаналізовано стан земельних ресурсів, які складають основу економіки області. Встановлено, що надзвичайно високий рівень розораності територій (понад 82%) та інтенсифікація сільськогосподарського виробництва призводять до деградації ґрунтового покриву, водної та вітрової ерозії, а також до зниження вмісту гумусу, попри загалом високу природну родючість чорноземів регіону. Окрему увагу приділено трансформації водних ресурсів. Визначено, що область належить до маловодних регіонів, а інтенсивне використання поверхневих вод промисловими та комунальними підприємствами призводить до їх виснаження та забруднення. Висвітлено проблему скидання недостатньо очищених стічних вод, що погіршує якість питної води для населення громад.

Досліджено вплив гірничо-видобувного комплексу на геологічне середовище. Розглянуто ризики, пов'язані з розробкою уранових та буровугільних родовищ, що спричиняють зміну гідрологічного режиму підземних вод та радіаційне навантаження на прилеглі території. Встановлено, що урбоекологічні трансформації мають системний характер і потребують впровадження інтегрованого підходу до управління природними ресурсами.

Наукова новизна полягає в уточненні показників антропогенної перетвореності ландшафтів області та оцінці ефективності регіональної екологічної політики. Практичне значення результатів дослідження полягає у можливості їх використання для розробки стратегій сталого розвитку територіальних громад, планів екологічного оздоровлення басейнів річок та програм рекультивації порушених земель. Запропоновано заходи щодо оптимізації структури земельного фонду шляхом збільшення частки природно-заповідних територій та впровадження систем екологічного моніторингу на базі сучасних ГІС-технологій.
Ключові слова: природно-ресурсний потенціал, екологічна трансформація, Кіровоградська область, антропогенне навантаження, земельні ресурси, моніторинг довкілля, екологічна безпека.

Urboecological transformations of natural resources in the Kirovohrad region. Podzerei R.

The article provides a comprehensive study of the processes of urbo-ecological transformation of the natural resource potential of the Kirovohrad region under conditions of intensive anthropogenic and technogenic pressure. The relevance of the topic is determined by the specific nature of the region, which combines a powerful agro-industrial sector with a unique mineral and raw material base, creating critical loads on the environment.

The paper analyzes the state of land resources, which form the basis of the region's economy. It has been established that an extremely high level of land plowing (over 82%) and the intensification of agricultural production lead to the degradation of the soil cover, water and wind erosion, as well as a decrease in humus content, despite the generally high natural fertility of the region's chernozems. Particular attention is paid to the transformation of water resources. It is determined that the region belongs to water-scarce areas, and the intensive use of surface waters by industrial and municipal enterprises leads to their depletion and pollution. The problem of discharging insufficiently treated wastewater, which deteriorates the quality of drinking water for the population of local communities, is highlighted.

The impact of the mining complex on the geological environment has been investigated. The risks associated with the development of uranium and brown coal deposits, which cause changes in the hydrological regime of groundwater and radiation load on adjacent territories, are considered. It has been established that urbo-ecological transformations are of a systemic nature and require the implementation of an integrated approach to natural resource management.

The scientific novelty lies in clarifying the indicators of anthropogenic transformation of the region's landscapes and evaluating the effectiveness of regional environmental policy. The practical significance of the research results consists in the possibility of their application for developing sustainable development strategies for local communities, river basin environmental recovery plans, and land reclamation programs for disturbed areas. Measures are proposed to optimize the structure of the land fund by increasing the share of nature-protected territories and implementing environmental monitoring systems based on modern GIS technologies. *Key words:* natural resource potential, ecological transformation, Kirovohrad region, anthropogenic load, land resources, environmental monitoring, environmental safety.

Актуальність дослідження. У сучасних умовах глобалізації та посилення антропогенного тиску на навколишнє природне середовище проблема раціонального використання та охорони природних ресурсів набуває стратегічного значення для забезпечення національної безпеки України. Кіровоградська область є унікальним регіоном зі складною структурою природно-ресурсного потенціалу, де інтенсивне

© Подзерей Р.В., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

сільськогосподарське виробництво поєднується з масштабним промисловим освоєнням надр. Така специфіка господарювання зумовлює глибокі урбоекологічні трансформації всіх компонентів довкілля, що потребує детального наукового аналізу та розробки дієвих механізмів управління.

Критичний рівень розораності земель області, який є одним із найвищих в Україні, призводить до прогресуючої деградації ґрунтового покриву, порушення гідрологічного режиму та втрати біорізноманіття. Водночас статус Кіровоградщини як провідного вузла гірничо-видобувної промисловості (зокрема уранової та буровугільної галузей) створює специфічні техногенні ризики, пов'язані з радіаційним забрудненням та трансформацією геологічного середовища.

Постановка проблеми. Проблема ускладнюється дефіцитом якісних водних ресурсів, що є характерним для регіону, та низьким рівнем заповідності територій, який не забезпечує належного екологічного балансу. Враховуючи виклики воєнного часу та необхідність післявоєнного відновлення за принципами «зеленої економіки», оцінка екологічного стану природних ресурсів Кіровоградської області та обґрунтування шляхів їх сталого використання є надзвичайно своєчасним та практично значущим завданням. Необхідність пошуку балансу між економічним розвитком урбанізованих територій та збереженням природних екосистем визначає вибір теми дослідження та її актуальність для сучасної екологічної науки.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Представлене дослідження безпосередньо пов'язане з актуальними науковими та прикладними завданнями у сфері раціонального природокористування, екологічної безпеки та сталого розвитку регіонів України. Отримані результати розвивають сучасні наукові підходи до оцінювання урбоекологічних трансформацій природно-ресурсного потенціалу та доповнюють теоретико-методологічні засади управління природними ресурсами в умовах інтенсивного антропогенного навантаження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання екологічного стану, раціонального використання та охорони природно-ресурсного потенціалу України та її регіонів постійно перебувають у центрі уваги наукової спільноти. Теоретико-методологічні засади функціонування природних ресурсів як особливого об'єкта еколого-економічної оцінки закладені у працях А. Третяка[8], який досліджував концептуальні основи землекористування, та О. Фурдичка[10], чиї роботи присвячені оцінці лісових ресурсів як складників ноосфери.

Особливості екологічних трансформацій в аграрному секторі, що є критично важливим для Кіровоградщини, детально висвітлені у дослідженнях В. Уланчук[9], О. Тараріко та ін.[7], які акцентують увагу на деградаційних процесах у ґрунтах та змінах біологічної активності екосистем під впливом інтенсивного землеробства.

Регіональний аспект екологічних проблем Кіровоградської області представлений у працях місцевих дослідників. Зокрема, О. Медведєва[4] аналізує стан водних екосистем та вплив гідротехнічної меліорації. Питання оптимізації мережі природно-заповідного фонду як ключового інструменту збереження біорізноманіття регіону висвітлено у роботах О. Гелевери та А. Зарубіної[1]. Проте, незважаючи на значний масив наукових напрацювань, комплексний аналіз урбоекологічних трансформацій природних ресурсів області з урахуванням сучасних техногенних змін та викликів екологічній безпеці потребує подальшого уточнення та систематизації.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Незважаючи на наявність значної кількості досліджень, проблема урбоекологічних трансформацій природних ресурсів регіону залишається недостатньо розробленою в комплексному аспекті. Потребують уточнення питання інтегрованої оцінки змін земельних, водних і мінеральних ресурсів під впливом сучасних техногенних чинників. Недостатньо опрацьованими є також підходи до використання ГІС-технологій у системі екологічного моніторингу та практичні механізми управління природними ресурсами на регіональному рівні. Це зумовлює необхідність подальших досліджень у зазначеному напрямі.

Наукова новизна дослідження. Наукова новизна роботи полягає у здійсненні комплексного аналізу урбоекологічних трансформацій природно-ресурсного потенціалу Кіровоградської області з урахуванням сучасних антропогенних і техногенних навантажень. Уточнено підходи до оцінювання ступеня антропогенної перетвореності природних компонентів регіону та визначено взаємозв'язки між деградацією земельних, водних і мінерально-сировинних ресурсів.

Методологічне та загальнонаукове значення. Методологічне значення дослідження полягає в обґрунтуванні комплексного підходу до аналізу урбоекологічних трансформацій природно-ресурсного потенціалу регіону, який передбачає інтеграцію еколого-географічних, економічних та соціальних аспектів. У роботі систематизовано наукові підходи до оцінювання антропогенного впливу на природні ресурси та уточнено методичні засади їх комплексного моніторингу із застосуванням сучасних геоінформаційних технологій. Отримані результати можуть бути використані як теоретико-методична основа для подальших досліджень у галузі урбоекології, природокористування та екологічної безпеки регіонів

Виклад основного матеріалу дослідження. Аналіз сучасного стану природних ресурсів Кіровоградської області свідчить про те, що вони

є результатом тривалого та інтенсивного антропогенного впливу, який призвів до суттєвих урбоекологічних трансформацій. Область, займаючи площу 24,6 тис. км² (4,1% території України), характеризується унікальним для країни поєднанням потужного аграрного сектору та розгалуженого гірничо-видобувного комплексу, що визначає специфіку та складність регіональних екологічних викликів.

Найбільшого антропогенного тиску в регіоні зазнає земельний фонд, який є базовим елементом економіки області. Загальна площа сільськогосподарських угідь на Кіровоградщині становить 2030,3 тис. га, що охоплює 82,65% від її загальної території. Цей показник значно перевищує середньо українські значення, а надзвичайно високий рівень розораності (понад 70% загальної площі та 85,5% площі сільгоспугідь) свідчить про критичне перевантаження природних ландшафтів. Хоча якісний аналіз ґрунтів вказує на те, що понад 93% площі ріллі мають підвищений та високий вміст гумусу (із середньозваженим показником 3,8–4,2%), у регіоні спостерігається небезпечна тенденція до дегуміфікації. Через значний дефіцит внесення органічних добрив, обсяг яких у середньому становить менше 1 т/га при нормі 8-10 т/га, баланс гумусу залишається від'ємним. Додатково трансформація земельних ресурсів проявляється у посиленні ерозійних процесів: більше половини угідь області є ерозійно небезпечними, що посилюється низьким рівнем лісистості території (лише 7,2%), яка не спроможна виконувати належну ґрунтозахисну функцію[2].

Паралельно з деградацією земельних ресурсів гостро стоїть питання стану водного середовища, оскільки Кіровоградщина належить до найменш забезпечених водою регіонів України. Ресурсний потенціал тут формується переважно за рахунок транзитного стоку річок Дніпро та Південний Буг. Урбоекологічна трансформація водних ресурсів виражається у їхньому прогресуючому забрудненні, особливо поверхневих вод. Так, протягом останніх років при загальному заборі води з природних об'єктів у обсязі приблизно 146 млн м³, ключовою проблемою залишається неефективність очисних споруд. Обсяг скиду зворотних вод склав 47,8 млн м³, причому більше половини з них (50,5%) – це недостатньо очищені стоки. Основними забруднювачами виступають підприємства комунального господарства, зокрема: ОКВП «Дніпро–Кіровоград»(Кропивницьке ВКГ, Олександрійське ВКГ, Смолінське ВКГ та Знам'янське ВКГ); ДП «Східний гірничо-збагачувальний комбінат»; КП «Павлиське», КП «Мала Виска Водоканал», Новоукраїнське ЖКП, КП «Нілот»[6]. Як наслідок, у воді річок Інгул та Інгулець постійно фіксуються перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) за вмістом азоту амонійного, фосфатів, сульфатів та нафтопродуктів, що свідчить про втрату екосистемами здатності до природного самоочищення.

Не менш глибоку трансформацію геологічного середовища спричиняє експлуатація мінерально-сировинної бази, яка налічує близько 350 родовищ. Видобуток уранових руд на Інгульській та Смолінській шахтах створює специфічне радіаційне навантаження та ризики для підземних водоносних горизонтів через накопичення радіоактивних відходів. У той же час, буровугільний комплекс, попри стагнацію галузі в Олександрійському районі, залишив по собі тисячі гектарів порушених земель у вигляді кар'єрів та відвалів, що потребують термінової рекультивації. Розробка Завалівського родовища графіту та перспективне освоєння родовищ літію і золота також ведуть до незворотної зміни природних ландшафтів, формування техногенних рельєфів та значного пилового забруднення атмосфери.

В умовах інтенсивної урбанізації стан повітряного басейну області визначається викидами від стаціонарних та пересувних джерел, переважно підприємств переробної промисловості, енергетики та газотранспортної системи. У 2025 році загальний обсяг викидів склав 36,8 тис. тонн, причому основне навантаження припадає на Кропивницький, Олександрію та Світловодськ. Характерною особливістю техногенного тиску на регіон є також критичне накопичення відходів: на полігонах та у відвалах області наразі зосереджено понад 45,5 млн тонн промислових та побутових відходів, що створює постійний токсичний тиск на прилеглі екосистеми та здоров'я населення.

Важливим інструментом протидії урбоекологічним трансформаціям у регіоні виступає розвиток мережі природно-заповідного фонду (ПЗФ), яка станом на сьогодні в Кіровоградській області налічує 241 тис. га. території та об'єкти загальною площею 103,4 тис. га. Незважаючи на значну кількість заповідних об'єктів, інтегральний показник заповідності регіону становить лише 4,2%, що суттєво менше за середньо українське значення (близько 7%), є недостатнім для підтримання екологічної стабільності аграрно-промислового краю та значно нижче середньоєвропейського рівня (10-15% або понад 18% для ЄС)[5]. Структура ПЗФ області охоплює об'єкти загальнодержавного та місцевого значення, що покликані оберігати унікальні лісостепові та степові екосистеми. Ключовим осередком збереження рідкісних видів деревно-чагарникової флори та еталоном штучного паркобудівництва є дендрологічний парк загальнодержавного значення «Веселі Боковеньки». Критичне значення для підтримки гідрологічного балансу верхів'їв річки Інгулець має Чорноліський заповідний масив, зокрема гідрологічна пам'ятка природи «Болото Чорний ліс», що є найпівденнішим сфагновим болотом в Україні. Регіональна мережа доповнюється заказниками місцевого значення, такими як ландшафтний заказник «Карпенків край», пов'язаний з історико-культурною цінністю хутора Надія, та «Монастирище» -

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

унікальне скельне утворення в долині річки Інгул із виходами докембрійських гранітів. Також важливу роль у функціонуванні регіональної екомережі відіграють «Савранський ліс» та низка заповідних урочищ («Чорноліське», «Кіровське», «Торговиця»), які виконують функції екологічних коридорів)[3].

Проведений аналіз засвідчив, що більшість заповідних об'єктів області характеризуються невеликою площею та залишаються територіально ізольованими посеред інтенсивних агроландшафтів. Урбоекологічна трансформація територій, що оточують заповідні зони, зокрема розорювання земель безпосередньо по периметру їхніх меж та активне застосування пестицидів, спричиняє виникнення «крайового ефекту». Це призводить до поступової деградації заповідних екосистем та негативно впливає на популяції рідкісних видів, занесених до Червоної книги України, таких як сон-трава, тюльпан дібровний та ковила волосиста. Для стабілізації екологічної ситуації в роботі обґрунтовано необхідність створення нових заповідних об'єктів у долинах малих річок та запровадження програм рекультивації відпрацьованих кар'єрів із подальшим їх включенням до структури екологічного каркаса області.

Головні висновки. Проведене дослідження процесів урбоекологічної трансформації природних ресурсів Кіровоградської області дозволяє сформулювати такі основні положення:

Встановлено, що сучасний екологічний стан регіону визначається критичним рівнем антропогенного навантаження, що зумовлено специфічним поєднанням інтенсивного агропромислового виробництва та масштабного видобутку корисних копалин. Земельні ресурси області зазнали глибокої трансформації: розораність територій, що перевищує 82%, призвела до деградації ґрунтового покриву, порушення природних ландшафтів та стійкого дефіциту гумусу через недостатнє внесення органічних добрив.

Виявлено, що водна екосистема регіону перебуває у стані значного напруження. Будучи маловодною областю, Кіровоградщина стикається з проблемою прогресуючого забруднення поверхневих вод. Понад половина обсягу зворотних вод скидається у водні об'єкти недостатньо очищеними, що призводить до накопичення сполук азоту, фосфатів та сульфатів у басейнах річок Інгул та Інгулець, обмежуючи можливості їхнього використання для питних та господарських потреб.

Аналіз впливу гірничо-видобувного комплексу показав, що експлуатація уранових, вугільних та графітових родовищ спричиняє незворотні зміни геологічного середовища. Основними ризиками залишаються зміна гідродинамічного режиму підземних вод, накопичення багатотоннажних промислових відходів та потенційне радіаційне забруднення територій, що потребує посиленого моніторингу та впровадження програм рекультивації техногенних ландшафтів.

Обґрунтовано, що існуюча мережа природно-заповідного фонду (4,2% території) є недостатньою для нейтралізації негативних урбоекологічних впливів. Заповідні об'єкти існують переважно як ізольовані осередки в агроландшафтах, що підсилює їх вразливість. Для стабілізації екологічного стану області необхідно реалізувати стратегію сталого управління ресурсами, яка передбачає розширення екологічної мережі, модернізацію комунальних очисних споруд та впровадження ґрунтозахисних технологій у землекористуванні.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати дослідження можуть бути використані при розробці регіональних стратегій сталого розвитку та програм раціонального природокористування, зокрема для оптимізації структури землекористування, удосконалення систем екологічного моніторингу та підвищення ефективності природоохоронних заходів. Запропоновані підходи до оцінювання урбоекологічних трансформацій доцільно застосовувати в діяльності органів місцевого самоврядування та екологічних служб при плануванні заходів із відновлення порушених територій і забезпечення екологічної безпеки.

Крім того, результати роботи можуть бути використані в освітньому процесі закладів вищої освіти під час викладання дисциплін екологічного спрямування, а також слугувати основою для подальших наукових досліджень у галузі урбоекології та регіонального природокористування.

Література

1. Гелевера О., Зарубіна А. Оптимізація мережі ПЗФ Кіровоградської області, аналіз земельних і лісових ресурсів у контексті формування регіональної екомережі. URL: http://dspace.tnpu.edu.ua (дата звернення: 27.03.2026).
2. Екологічний паспорт Кіровоградської області за 2025 рік. Департамент екології та природних ресурсів Кіровоградської ОВА. URL: https://mepr.gov.ua/files/docs/eco_passport/2019/Кіровоградська.pdf (дата звернення: 28.03.2026).
3. Комплексна програма охорони навколишнього природного середовища в Кіровоградській області на 2021 – 2025 роки: Рішення Кіровоградської обласної ради від 30.03.2021 №86. URL: https://library.kr.ua/wp-content/uploads/2021/04/02_04_2021_KP.pdf (дата звернення: 20.03.2026).
4. Медведєва О. Дослідження водних екосистем Кіровоградської області. URL: ecology.kntu.kr.uakntu.kr.ua (дата звернення: 16.03.2026).
5. Про природно-заповідний фонд України: Закон України від 16 черв. 1992 р. № 2456-XII. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2456-12 (дата звернення: 28.04.2026).
6. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища Кіровоградської області. Департамент екології та природних ресурсів Кіровоградської ОДА. URL: https://mepr.gov.ua. (дата звернення: 16.03.2026).

7. Тараріко О. Г., Кучма Т. Л., Ільєнко Т. В., Дем'янюк О. С. Ерозійна деградація ґрунтів України за впливу змін клімату. *Агроекологічний журнал*. 2017. № 1. С. 7–15.
8. Третяк А. М. Концептуальні засади розвитку сільськогосподарського землекористування сільських територій : проект. Київ: Національна академія аграрних наук України, 2014. 24 с.
9. Уланчук В. С. Шляхи підвищення ефективності використання земельних ресурсів у сільського господарських підприємствах регіону. Економіка АПК. 2019. №6. С. 10–14.
10. Фурдичко О. І., Артюшок К. А. Еколого-економічна оцінка лісових земель як особливого ресурсу ноосфери. *Агросвіт*. 2012. № 2. С. 2–6.

Дата першого надходження статті до видання: 29.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 628.511:66.067.3:620.3
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.35

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА РОЗРОБОК У ПОШУКУ ДОСТУПНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ ФІЛЬТРУВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ПОВІТРЯ

Стасевич С.П., Махняк А.Я.
Національний університет «Львівська політехніка»
вул. С. Бандери 12, м. Львів, 79013
serhiy.p.stasevych@lpnu.ua, andrii.y.makhniak@lpnu.ua

У статті представлено комплексний порівняльний аналіз новітніх технологій виготовлення фільтрувальних матеріалів для очищення повітря від дрібнодисперсних частинок (PM2.5) та токсичних газів. Доведено, що традиційні методи фільтрації (HEPA, целюлозні фільтри, циклони) не забезпечують комплексного вирішення проблеми в умовах агресивних промислових середовищ через швидке засмічення, високий аеродинамічний опір та термічну нестабільність. Досліджено ефективність застосування нановолокнистих мембран, отриманих методом електроформування, які завдяки надзвичайно високій пористості забезпечують ефективне захоплення забруднювачів при мінімальному перепаді тиску. Особливу увагу приділено інтеграції металоорганічних каркасів (MOF) у біорозкладні полімерні матриці, що дозволяє перетворити пасивну бар'єрну фільтрацію на активний процес із каталітичною нейтралізацією токсичних газів та вирішує проблему екологічної утилізації. Для ділянок із критично високими температурами обґрунтовано використання ієрархічних керамічних аерогелів, здатних зберігати експлуатаційні характеристики та ефективність понад 99,95% при нагріванні до 1000 °C. Проаналізовано перспективи адитивних технологій (3D-друку) у створенні детермінованих мікроканальних ґратчастих і каталітичних монолітних структур для зменшення опору та ефективного окиснення летких органічних сполук (ЛОС). Вперше дані інноваційні матеріалознавчі рішення розглядаються в синергії з фізичними методами попереднього очищення, зокрема акустичною агломерацією для укрупнення субмікронних частинок, та архітектурою Інтернету речей (IoT). Запропоновано використання багатомодельного адаптивного фільтра Калмана для динамічного прогнозування концентрації забруднень, нівелювання промислових шумів і автоматизованого управління витяжними потужностями. Результати дослідження формують науково-технологічні передумови для переходу від статичних бар'єрів до створення гібридних інтелектуальних систем екологічного менеджменту на техногенних підприємствах. *Ключові слова:* очищення повітря, дрібнодисперсні частинки PM2.5, фільтрувальні матеріали, електроформування, нановолокнисті мембрани, металоорганічні каркаси (MOF), керамічні аерогелі, адитивні технології, 3D-друк, акустична агломерація, Інтернет речей (IoT), фільтр Калмана.

Comparative analysis of research and development in search of available technologies for manufacturing filtering materials for air purification. Stasevych S., Makhniak A.

The article presents a comprehensive comparative analysis of advanced technologies for manufacturing air filtration materials designed to remove fine particulate matter (PM2.5) and toxic gases. It is proven that traditional filtration methods (HEPA, cellulose filters, cyclones) fail to provide a comprehensive solution in harsh industrial environments due to rapid clogging, high aerodynamic resistance, and thermal instability. The efficiency of electrospun nanofibrous membranes is investigated; thanks to their extremely high porosity, they ensure effective capture of pollutants with a minimal pressure drop. Special attention is paid to the integration of metal-organic frameworks (MOFs) into biodegradable polymer matrices, which transforms passive barrier filtration into an active process involving the catalytic neutralization of toxic gases and solves the problem of eco-friendly disposal. For areas with critically high temperatures, the use of hierarchical ceramic aerogels capable of maintaining operational characteristics and efficiency of over 99.95% at heating up to 1000 °C is substantiated. The perspectives of additive manufacturing (3D printing) in creating deterministic microchannel lattice and catalytic monolithic structures to reduce flow resistance and efficiently oxidize volatile organic compounds (VOCs) are analyzed. For the first time, these innovative materials science solutions are considered in synergy with physical pre-cleaning methods, specifically acoustic agglomeration for enlarging submicron particles, and Internet of Things (IoT) architecture. The use of a multiple-model adaptive Kalman filter for dynamic forecasting of pollution concentration, leveling of industrial noise, and automated control of exhaust capacities is proposed. The research results form the scientific and technological prerequisites for the transition from static barriers to the creation of hybrid intelligent environmental management systems at industrial enterprises. *Key words:* air purification, fine particulate matter PM2.5, filtration materials, electrospinning, nanofibrous membranes, metal-organic frameworks (MOFs), ceramic aerogels, additive manufacturing, 3D printing, acoustic agglomeration, Internet of Things (IoT), Kalman filter.

Постановка проблеми. Природні процеси, такі як розпад органічної речовини в ґрунтах, вулканічні виверження та лісові пожежі, які часто виникають внаслідок діяльності людини, призводять до викидів у повітря небезпечних газів, диму та попелу, що формують базовий рівень атмосферного забруднення [1]. Однак у сучасних умовах це забруднення набуло особливої загрози для здоров'я людей через посилений негативний вплив діяльності техногенних підприємств, оскільки містить шкідливі компоненти,

© Стасевич С.П., Махняк А.Я., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

зокрема дрібнодисперсні частинки PM2,5, які здатні проникати глибоко в організм і викликати широкий спектр захворювань. У результаті забруднення повітря стало однією з ключових глобальних проблем, що спричиняє передчасну смертність, погіршення якості життя населення та негативно впливає на екосистеми, вимагаючи системного підходу до його зменшення та контролю [12, 13].

Забруднення повітря тягне за собою зміну природних характеристик внутрішнього або навколишнього середовища через викид біологічних, хімічних або фізичних речовин [1]. Основні фактори забруднення повітря включають неякісні транспортні засоби, що використовують забруднююче паливо, нестійку побутову практику, що значною мірою передбачає використання палива та речовин, що викидають вуглець, для опалення, приготування їжі та освітлення, споживання вугілля та нерегульоване спалювання відходів. Згідно зі звітом Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ) [2], населення світу стикається з серйозним ризиком забруднення повітря: приблизно 99% людей дихають повітрям, що містить значні забруднюючі речовини, що перевищують рекомендовані порогові рівні, встановлені ВООЗ.

Забруднення навколишнього середовища, що виникає внаслідок впливу забруднюючих речовин, як бруд, пил, дим, сажа, краплі рідини та промислові хімікати [9,10] утворюється у вигляді твердих частинок (PM) і вважається основним джерелом забруднення повітря [11]. Частинки діаметром 2,5 мікрометри (PM2,5) визначені як такі, що становлять найбільший ризик для здоров'я людей. Відповідно до оновлених рекомендацій ВООЗ 2021 року, нормативи якості повітря стали суворішими порівняно з показниками 2005 року: допустима середньорічна концентрація часток PM2.5 знизилася з 10 до 5 мкг/м³, а середньодобова – з 25 до 15 мкг/м³. Для часток PM10 середньорічний поріг зменшили з 20 до 15 мкг/м³, а середньодобовий – з 50 до 45 мкг/м³. Головною причиною такого перегляду стало накопичення наукових доказів того, що забруднення повітря негативно впливає на здоров’я людини навіть при значно нижчих концентраціях, ніж вважалося раніше.

Зокрема, вплив PM2,5 збільшує ймовірність серцево-судинних захворювань [15], інсультів, хронічних обструктивних хвороб легень, раку дихальних шляхів, зниження видимості та інших несприятливих наслідків [12,13,14], що призводить до вищого рівня передчасної смертності та скорочення тривалості життя. Найбільш вразливими до такого впливу є діти, літні люди та особи з хронічними захворюваннями, у яких навіть короткочасний вплив забрудненого повітря може викликати загострення симптомів. У всьому світі PM2.5 є причиною мільйонів смертей [16]. Таким чином, проблема глобального забруднення PM2.5 є критичною, і для її вирішення потрібні термінові та ефективні заходи.

Актуальність дослідження. Рішенням для зниження викидів твердих частинок в навколишнє середовище є застосування фільтруючого устаткування з ефективними методами очищення повітря від шкідливих включень. Основою фільтруючого устаткування є фільтр, що забезпечує сепарацію дисперсної твердої фази від дисперсійного середовища із заданою ефективністю та мінімальними енергетичними втратами. При проектуванні фільтрувальних систем ключовими параметрами, що визначають їхню експлуатаційну придатність, є забезпечення заданої ефективності очищення, мінімізація аеродинамічного опору та максимізація пилоємності. Досягнення оптимального балансу між цими характеристиками є пріоритетною метою.

Ринок пропонує широкий спектр рішень з різними показниками ефективності. Зокрема, золотим стандартом у галузі вважаються паперові та волокнисті фільтри класів HEPA (High Efficiency Particulate Air) та ULPA (Ultra-Low Penetration Air), які отримали найбільше розповсюдження завдяки своїй високій здатності затримувати дрібнодисперсні частки. Менш ефективними але досить поширеними також є целюлозні фільтри, які використовуються як у вигляді паперу для лабораторної фільтрації, так і у вигляді нетканих волокон у панельних фільтрах для систем вентиляції та кондиціонування і здатні затримувати пил та інші механічні домішки, залежно від пористості та способу виготовлення [17].

Стандартні HEPA та ULPA-фільтри, а також целюлозні фільтри чудово працюють у побуті, але на техногенних підприємствах вони швидко забиваються, не витримують високих температур і створюють величезний перепад тиску. Ще одним видом фільтрації, що найчастіше застосовуються на техногенних підприємствах є використання циклонних сепараторів, принцип роботи яких базується на використанні відцентрової сили для відділення зважених часток, що виключає потребу у пористих фільтрувальних матеріалах. Однак, ця технологія має суттєве обмеження: низьку ефективність вловлювання дрібнодисперсних фракцій (розміром менше 5–10 мкм).

Традиційні методи фільтрації не забезпечують комплексного вирішення проблеми очищення повітря від дрібнодисперсних частинок. Попри високу ефективність вловлювання, недоліком існуючих аналогів є необхідність частої заміни одноразових компонентів, що зумовлює високу вартість експлуатації. Окрім того, утилізація відпрацьованих фільтрів, які зазвичай не підлягають рециклінгу, створює додаткове екологічне навантаження та суперечить принципам сталого розвитку. Враховуючи зазначені обмеження, виникає гостра необхідність переходу до фільтрувальних матеріалів нового покоління, здатних працювати в агресивних промислових умовах.

Зв’язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Визначальним етапом модернізації є інтеграція сис-

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

тем фільтрації в архітектуру Інтернету речей (IoT). Використання масивів високоточних оптичних сенсорів у поєднанні з мікроконтролерами забезпечує безперервний моніторинг якості повітря. Завдяки алгоритмічній обробці даних (наприклад, використанню фільтрів Калмана для мінімізації промислових шумів у вимірюваннях) система здатна динамічно регулювати потужність витяжного обладнання залежно від поточної концентрації забруднювача в реальному часі. Для досягнення максимальної ефективності та енергозбереження необхідний перехід до «розумного» управління повітряними потоками та попередньої підготовки викидів.

Розвиток технологій фізичного впливу, таких як акустична агломерація, дозволяє за допомогою звукових хвиль укрупнювати субмікронні частинки до розмірів (понад 10 мкм), які потім з легкістю вловлюються класичними циклонами. Це суттєво знижує пилове навантаження на тонкі фільтрувальні елементи на наступних етапах очищення. Таким чином, парадигма сучасного очищення повітря на техногенних підприємствах еволюціонує від простого застосування статичних бар'єрів до створення гібридних автоматизованих комплексів. Синергія передових наноматеріалів, просторового моделювання та інтелектуальних систем адаптивного управління потоками є тим необхідним кроком, який дозволить вирішити проблему забруднення дрібнодисперсним пилом ефективно та економічно доцільно, що повністю відповідає завданням галузі технологій захисту навколишнього середовища.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасний вектор досліджень зосереджений на застосуванні нановолокнистих мембран (зокрема, створених методом електроформування), які завдяки надзвичайно високій пористості забезпечують ефективне захоплення частинок PM2.5 при мінімальному аеродинамічному опорі [18-20]. Тривалий час стандартом залишалися мікроволоконні матеріали, однак у традиційних фільтрувальних матеріалах діаметр волокна зазвичай знаходиться в мікрометровому діапазоні, а сам фільтр складається з кількох шарів [18]. Хоча такий фільтр здатний досягти високої ефективності видалення частинок, він збільшує аеродинамічний опір та підвищує енергоспоживання обладнання. Функціонування нановолоконних мембран базується на фізичному захопленні твердих частинок із газового потоку [19, 20].

Традиційні фільтрувальні матеріали, які захищають дихальні шляхи від токсичних газів та дрібнодисперсного пилу, переважно виготовляються з матеріалів на основі нафти. Широке застосування таких матеріалів стає серйозним викликом для інфраструктури переробки та утилізації. Згідно з даними попередніх матеріалознавчих досліджень, застосування металоорганічних каркасів (MOF) демонструє високу ефективність у процесах сорбції токсичних газів, що зумовлено їхньою розвиненою питомою поверхнею та високою пористістю [29].

Щодо високотемпературних умов, проблема очищення викидів від твердих частинок залишається одним із головних викликів. Як зазначають у своїх дослідженнях Li та ін. [31], а також Hao та ін. [32], розробка термостійких нановолокнистих мембран є критично важливою для промисловості. Проте існуючі рішення часто демонструють високий опір потоку повітря або обмежений термін служби при екстремальних температурах [33].

На відміну від традиційних відкритопористих піноматеріалів, які мають стохастичний характер внутрішньої морфології, технологія 3D-друку забезпечує безпрецедентний рівень керованості структурою матеріалу. Як показано у роботах [35, 36], класичні методи виробництва не дають можливості прецизійно контролювати локальну архітектуру комірок, що суттєво обмежує аеродинамічну оптимізацію фільтрувальних середовищ. Натомість адитивне виробництво повністю долає ці лімітації, дозволяючи створювати оптимізовані детерміновані геометрії із наперед заданими характеристиками.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Незважаючи на високий потенціал, кожна з новітніх технологій має певні обмеження, які стримують їхнє масове впровадження і які досі залишалися недостатньо систематизованими в єдиному порівняльному аналізі. Аналіз ефективності методу електроспінінгу вказує на два головні бар'єри: низька виробнича потужність та той факт, що промислове виробництво ще не повністю реалізовано [25, 26]. Створення складних функціональних фільтрів супроводжується складністю виробництва та високою вартістю [27].

Для біорозкладних мембран з MOF дослідники відзначають технологічний компроміс: спроби підвищити ефективність захоплення пилу до 99% шляхом збільшення шару нановолокон призводять до різкого зростання опору повітря (до ~67 Па). У сфері високотемпературних аерогелів варто звернути увагу на технологічну складність процесу. Створення багатошарового фільтра вимагає складного багатокомпонентного синтезу та енергоємного високотемпературного випалювання, що суттєво підвищує вартість [31, 33].

В адитивних технологіях вагомим технологічним викликом залишається явище потоншення структурних елементів (strut-thinning), що призводить до просторової невідповідності між надрукованим зразком та цифровою моделлю [40]. При друці антибактеріальних полімерів основним недоліком є явище «занурення» наночастинок металу вглиб полімерної матриці, внаслідок чого матеріал втрачає здатність до інгібування росту бактерій у сухому стані [41]. У каталітичних монолітах критичним фактором є значна об'ємна усадка матеріалу (до 22%) під час спікання [45].

Щодо моніторингу та агломерації, акустичні методи мають високу залежність ефективності від параметрів процесу, складність масштабування та значний рівень шуму. А впровадження IoT датчиків супроводжується високою чутливістю вихідних сигналів до шумів і дрейфу, вимагаючи складних алгоритмів фільтрації (таких як багатомодельний фільтр Калмана), що, у свою чергу, підвищує обчислювальну вартість [50].

Новизна. Наукова новизна роботи полягає у проведенні всебічного порівняльного аналізу розрізнених інноваційних методів виробництва фільтруючих матеріалів. Інтеграція металоорганічних каркасів (MOF) дозволяє перетворити пасивну бар'єрну фільтрацію на активний процес, залучаючи електростатичні сили та здатність до каталітичної нейтралізації супутніх токсичних газів. Для ділянок із критично високими температурами розробляються ізотропні керамічні аерогелі та поліімідні фільтри, які зберігають свої характеристики при нагріванні понад 300–700 °C.

Створення складних, оптимізованих структур таких новітніх фільтрів дедалі частіше реалізується за допомогою технологій адитивного виробництва (3D-друку). Це дозволяє проєктувати мікроканальні геометрії (наприклад, "лабіринтні" каталітичні структури), які значно знижують перепад тиску, створюють ідеальні умови для проходження повітря і уможливлюють створення багаторазових елементів, які легко піддаються регенерації, відповідаючи вимогам сталого розвитку. Однак, впровадження інноваційних матеріалів – це лише частина комплексного рішення, яке вперше в даній роботі розглядається крізь призму поєднання з IoT та фізичними методами (акустика).

Методологічне або загальнонаукове значення. Застосування електроформованих нановолоконних мембран, керамічних аерогелів та 3D-друкованих структур становить значний науково-практичний інтерес у контексті вдосконалення сучасних систем очищення повітря. Їхні специфічні морфологічні характеристики дозволяють досягти високого ступеня сепарації твердофазних включень за умов низького аеродинамічного опору, що нівелює фундаментальні недоліки класичних фільтрувальних середовищ.

Перехід від стохастичних відкритопористих піноматеріалів до детермінованих мікроканальних ґратчастих структур є актуальним напрямом вдосконалення аерозольних фільтрів. Прецизійне керування геометричними параметрами забезпечує створення систем із прогнозованими експлуатаційними характеристиками, що суттєво перевершують показники традиційних середовищ. Це формує науково-технологічні передумови для розробки спеціалізованих рішень у галузях промислової безпеки. Стратегія подальшого розвитку даного напряму вимагає вирішення інженерних завдань щодо промислового масштабування процесу та оптимізації економічних показників масового випуску.

Викладення основного матеріалу.

Блок 1: Інноваційні матеріали для захоплення мікрочастинок

1.1. Нановолокнисті мембрани (технологія електроформування)

Електроформовані нановолоконні мембрани у системах фільтрації повітря демонструють нові принципи та переваги. Саме потреба знизити перепад тиску та збільшити пилоємність стимулювала перехід до застосування волокон нанометрового діапазону. Завдяки малим розмірам пор, надзвичайно високій пористості (яка може сягати 80% і більше) та відмінній зв'язності, електроформовані мембрани ефективно вловлюють забруднювачі, зберігаючи при цьому достатній простір для проходження повітря.

Основним методом отримання таких мембран є електроспінінг (електроформування). Електроспінінг – це метод виробництва волокон шляхом витягування полімеру за допомогою сили електричного поля [21]. Процес формування нановолокон поділяється на три ключові етапи: 1) Полімерний розчин утворює краплю під дією поверхневого натягу та сили тяжіння; 2) Під впливом високої напруги поверхня краплі накопичує заряд і витягується; 3) Коли кулонівська сила перевищує поверхневий натяг, утворений конус (конус Тейлора) випускає прямий струмінь [22]. Через швидке випаровування розчинника струмінь стає нестабільним, починає хаотично вигинатися і розтягуватися, утворюючи тонкі полімерні волокна, що осідають на колекторі.

Впровадження електроформованих мембран дозволяє обійти критичні недоліки традиційних фільтрів. Сучасні матеріали відзначаються високою пористістю, хорошою зв'язністю пор, високою ефективністю видалення забруднень та низьким перепадом тиску [23, 24]. Окрім цього, процес забезпечує рівномірний діаметр волокон та є відносно простим однокроковим методом, який дозволяє легко модифікувати матеріали, наприклад, додавати наночастинки для створення антибактеріальних чи вогнезахисних властивостей [23, 24].

1.2. Металоорганічні каркаси (MOFs) та їх інтеграція в текстиль

Традиційні фільтрувальні матеріали мають високу хімічну стабільність, що призводить до екологічних проблем. Тому виникла нагальна потреба у створенні біорозкладних фільтрувальних матеріалів. Група вчених (Ryu S., Kim D. та ін., 2023) розробила інноваційну повністю біорозкладну мембрану, яка поєднує нановолокна, металоорганічні каркаси (MOF) та бавовну [28]. Запропонована мембрана характеризується біфункціональними властивостями, які забезпечують одночасну хімічну нейтралізацію газоподібних забруднювачів та ефективне уловлення дрібнодисперсних частинок (PM2.5).

Роль доступної полімерної підкладки виконує бавовняна основа, на поверхні якої шляхом спрямо-

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

ваної кристалізації формуються структури цеолітного імідазолатного каркаса (ZIF-8). У запропонованому композитному матеріалі шар MOF забезпечує ефективність адсорбції сірководню, формальдегіду та аміаку на рівні, що перевищує 99%. Оскільки природна макропористість бавовни перешкоджає ефективному затриманню субмікронних аерозолів, функцію фізичної сепарації PM2.5 реалізує осаджена на її поверхню методом електроформування нановолоконна сітка з ацетату целюлози. Мембрана демонструє ефективність фільтрації дрібнодисперсних частинок на рівні 93.1% при дуже низькому аеродинамічному опорі (перепад тиску лише 14.2 Па). Визначальною перевагою є здатність матеріалу до біологічного розпаду – втрата маси становить 62.5% вже через 45 днів у стандартних умовах компостування [30]. Дане дослідження демонструє життєздатність гібридних підходів у матеріалознавстві.

1.3. Високотемпературні рішення для екстремальних термальних умов

Традиційні неорганічні та полімерні нановолокнисті фільтри часто стикаються з проблемою термічної та механічної нестабільності. Логічним кроком у подоланні цих недоліків стала нещодавня розробка команди дослідників під керівництвом Chuan-Hui Guo, яка представила інноваційний ієрархічний гнучкий керамічний аерогель зі структурою багатомасштабного градієнтного волокна (gZCFA) [34]. Цей матеріал виготовляється інноваційним методом градієнтного аеродинамічного формування (air-blown spinning). Розчин-прекурсор видувається потоком повітря різної швидкості, що дозволяє формувати волокна різних діаметрів. Після збору матеріалу волокна випалюються при температурі 1100°C протягом 1 години.

В основі роботи фільтра лежить його ієрархічна структура з безперервним мультимасштабним градієнтом. Верхні, більш товсті волокна затримують великі частинки (PM10), середні – PM3, а найтонші волокна знизу вловлюють найдрібніші частинки (PM0.6). Такий підхід забезпечує багатоступеневу фільтрацію, мінімізує накопичення пилу лише на поверхні та запобігає засміченню [34]. Головною перевагою матеріалу є висока ефективність фільтрації, яка сягає 99,96% при перепаді тиску в 156 Па, а також безпрецедентна пилоємність на рівні 101 г/м². Матеріал зберігає робочу ефективність понад 99,95% навіть при впливі високих температур до 1000°C. Розробка ієрархічного керамічного волокнистого аерогелю з діоксиду цирконію ZrO2 пропонує масштабований шлях для створення систем очищення промислових димових газів нового покоління.

Блок 2: Адитивні технології (3D-друк) у проектуванні фільтрів

2.1. Створення складної мікроканальної геометрії

Впровадження адитивних технологій дозволяє здійснити перехід від випадкових пористих середовищ до впорядкованих ґратчастих структур (lattices), геометричні параметри яких можна цілеспрямовано модифікувати на мікрорівні. В основі лежить параметричне проектування ідеалізованих комірок, таких як кубічна, октаедрична або складні структури Кельвіна (Kelvin) та Вейра-Філана (Weaire-Phelan) [37]. Для виготовлення використовується метод цифрового синтезу світлом (Digital Light Synthesis, DLS) на базі полімерної смоли UMA90, що забезпечує високу точність відтворення мікроканалів.

Механізм очищення повітря базується на комбінації інерційного зіткнення частинок з елементами гратки та електростатичного притягання [38]. Ключовою перевагою є здатність нівелювати традиційний компроміс між високою ефективністю сепарації та низьким перепадом тиску [39]. 3D-друковані гратки забезпечують майже 100% ефективність вловлювання частинок навіть при високих швидкостях потоку (до 4 м/с).

2.2. Багаторазові префільтри зі спеціальними властивостями

Функціонування потужних систем вентиляції супроводжується ризиком акумуляції біологічних контамінантів. Згідно з дослідженнями [41], застосування методів адитивного виробництва дозволяє синтезувати фільтрувальні елементи з детермінованою пористістю та антимікробними поверхнями. В основі лежить використання методу моделювання методом наплавлення (FFF). В якості матриці обрано полілактид (PLA) та термопластичний поліуретан (TPU), армовані наночастинками міді (Cu) у концентрації 1 мас.%. Вибір міді базується на її здатності генерувати активні форми кисню [42, 43].

Процес передбачає друк гексагональних або лінійних структур із різним рівнем заповнення. Введення мідних наночастинок покращує експлуатаційні характеристики виробів, зокрема для TPU спостерігається зростання модуля пружності на 330% [41]. Використання термопластів дозволяє повністю переробляти відпрацьовані фільтри. Комбінація адитивного виробництва та нанокомпозитів відкриває шлях до створення нового покоління інтелектуальних систем фільтрації з функцією дезінфекції.

2.3. 3D-друк каталітичних монолітних структур

Леткі органічні сполуки (ЛОС) найефективніше нейтралізуються через каталітичне окиснення [45]. Впровадження технології 3D-друку (FFF) дозволяє створювати керамічні носії зі складними внутрішніми геометріями. Використання перехідних металів, таких як марганець та залізо, робить технологію економічно ефективною. Процес базується на використанні композитних філаментів з порошку діоксиду цирконію (ZrO2) та полімерного зв'язуючого компонента [46]. Після 3D-друку структури проходять термічну обробку та спікання при температурі близько 1475°C [45]. Активна фаза (MnFeOx) наноситься методом вологого просочення, де від-

бувається окиснення сполук групи BTEX (бензол, толуол, етилбензол, ксилол).

Експериментальні дані підтверджують, що поєднання структурної гнучкості ZrO2 та активності шару MnFeOx дозволяє досягти понад 99% ефективності знешкодження суміші BTEX при температурі всього 177°C [46]. Цей підхід є високоефективним рішенням для боротьби з промисловими викидами ЛОС.

Блок 3: Фізичні методи попереднього очищення

3.1. Акустична агломерація у витяжних каналах

Оскільки традиційні методи газоочищення демонструють недостатню здатність до уловлювання субмікронних часток, перспективним рішенням є акустична агломерація – процес, при якому звукові хвилі впливають на рух частинок у повітрі, сприяючи їх зіткненню та утворенню більших агломератів. Основними механізмами є ортокінетична взаємодія та гідродинамічні сили.

У дослідженні [47] доведено, що кінетика та ефективність коагуляції критично детермінуються параметрами звукового поля. Встановлено оптимальні режими: у частотному діапазоні 1500–3000 Гц та за рівня звукового тиску 129–135 дБ максимальний коефіцієнт ефективності агломерації сягав 80 % [47]. Технологія дозволяє значно зменшити концентрацію частинок розміром до 1 мкм (до 79 %) та одночасно збільшити частку більших частинок, що полегшує їх уловлювання класичними фільтрами.

Блок 4: Інтеграція системи моніторингу у процеси фільтрації

4.1. Роль IoT-архітектури у сучасному очищенні повітря

Широка доступність недорогих датчиків значно підвищила роздільну здатність моніторингу забруднення [48]. IoT-пристрій будується на базі компактного одноплатного комп'ютера Raspberry Pi Zero 2 W, до якого підключено мультисенсорний модуль Winsen (ZPHS01B), що фіксує концентрації PM2.5, PM10, вуглекислого газу, формальдегіду, ЛОС, температуру і вологість. Окремої уваги потребує процедура калібрування сенсорів. Для забезпечення достовірності даних в екстремальних промислових умовах критично важливо проводити експериментальне калібрування сенсорів температури та вологості, порівнюючи показники досліджуваного пристрою з еталонним датчиком у широкому діапазоні температур (від -50 до 80 °C), що дозволяє врахувати та компенсувати температурні девіації.

Ключовим інноваційним елементом є адаптивна фільтрація: система динамічно змінює розмір вікна згладжування для швидкого реагування [48]. Завдяки компактності забезпечується висока масштабованість мережі. Пристрій успішно пройшов тестування у транспортній інфраструктурі, довівши здатність безперервно реєструвати параметри [48]. Інтеграція IoT-рішень формує нову модель екологічного моніторингу для цифрової платформи «розумного міста» [48, 49].

4.2. Прогнозування концентрації (PM2.5) за допомогою адаптивного фільтра Калмана

Для підвищення загальної точності прогнозування була розроблена технологія багатомодельного адаптивного фільтра Калмана (MMAUKF) [50], яка концептуально спирається на теорію багатомодельного управління [51]. Принцип роботи базується на інтеграції даних з платформ моніторингу. На першому етапі добові дані розбиваються на три часові періоди. Для кожного створюється своя нелінійна модель на основі методу опорних векторів для регресії (SVR). Далі ця структура поєднується з адаптивним фільтром Калмана. На завершальному етапі прогнозовані значення об'єднуються за допомогою методу байєсівського зважування.

Головною перевагою є підвищення точності та стабільності порівняно з алгоритмами на базі єдиної моделі. Система гнучко адаптується до різних станів середовища. Застосування адаптивного фільтра Калмана дозволяє системі самостійно здійснювати оцінку стороннього шуму, уникаючи проблем з локальним перенавчанням нейронних мереж [52, 53]. Метод MMAUKF ефективно долає обмеження поодиноких статистичних моделей.

Головні висновки. На основі проведеного аналізу можна зробити такі ключові висновки щодо сучасного стану технологій очищення повітря:

1. Еволюція методів фільтрації неминуче рухається від пасивних статичних бар'єрів до інтелектуальних, ієрархічно структурованих матеріалів. Нановолокнисті мембрани та впровадження біорозкладних компонентів із металоорганічними каркасами (MOF) забезпечують високу ефективність уловлювання як дрібнодисперсного пилу, так і токсичних газів, одночасно вирішуючи проблему екологічної безпеки утилізації.

2. Для екстремальних умов техногенних підприємств найбільш перспективним матеріалознавчим рішенням є розробка градієнтних керамічних аерогелів, які демонструють безпрецедентну термічну стабільність (до 1000°C) та можливість багаторазової регенерації.

3. Адитивні технології (3D-друк) відкривають принципово нові можливості у конструюванні просторової архітектури фільтрів. Застосування мікроканальних ґраток дозволяє оптимізувати аеродинамічний опір, а друк композитів з наночастинками металів чи каталітичними покриттями забезпечує антибактеріальний захист та окиснення летких органічних сполук (ЛОС).

4. Комплексне вирішення проблеми неможливе без застосування допоміжних фізико-інформаційних систем. Акустична агломерація суттєво підвищує продуктивність попереднього очищення, а розгортання масштабованих IoT-мереж з використанням

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

передових математичних алгоритмів (багатомодельний адаптивний фільтр Калмана) дозволяє здійснювати динамічне прогнозування та автоматизоване управління вентиляційними потужностями у режимі реального часу.

Перспективи використання результатів дослідження. Практична реалізація розглянутих гібридних технологій здатна докорінно змінити підходи до екологічного менеджменту на промислових підприємствах. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на масштабування процесів виробництва (зокрема, подолання обмежень електроспінінгу та усадки при 3D-друці кераміки), а також на інтеграцію розроблених локальних фільтрувальних систем у глобальну екосистему "розумного підприємства" з метою мінімізації енергетичних витрат і досягнення нульового рівня шкідливих викидів.

Література

1. Dong D., Wang J. Air Pollution as a Substantial Threat to the Improvement of Agricultural Total Factor Productivity: Global Evidence. *Environment International*. 2023. Vol. 173. P. 107842. DOI: 10.1016/j.envint.2023.107842.
2. WHO Ambient Air Quality Database, 2022 Update: Status Report. Geneva : World Health Organization, 2023. 1st ed. URL: https://www.who.int/publications/i/item/9789240047693 (дата звернення: 22.04.2026).
3. Hu Y., Yao M., Liu Y., Zhao B. Personal Exposure to Ambient PM2.5, PM10, O3, NO2, and SO2 for Different Populations in 31 Chinese Provinces. *Environment International*. 2020. Vol. 144. P. 106018. DOI: 10.1016/j.envint.2020.106018.
4. Zhao S., Shi A., An H. et al. Does the Low-Carbon City Pilot Contribute to the Blue Sky Defense? Evidence from China. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Vol. 30, No. 35. P. 84595–84608. DOI: 10.1007/s11356-023-28712-2.
5. Liu Y., Cao G., Zhao N. Integrate Machine Learning and Geostatistics for High-Resolution Mapping of Ground-Level PM2.5 Concentrations // Spatiotemporal Analysis of Air Pollution and Its Application in Public Health. Elsevier, 2020. P. 135–151. DOI: 10.1016/B978-0-12-815822-7.00006-7.
6. Yu-Fei Xing. The Impact of PM2.5 on the Human Respiratory System. *Journal of Thoracic Disease*. 2016. Vol. 8, No. 1. P. E69. DOI: 10.3978/j.issn.2072-1439.2015.11.37.
7. Paul A. R., Jain A., Saha S. C. Exposure Assessment of Air Pollution in Lungs. *Atmosphere*. 2022. Vol. 13, No. 11. P. 1767. DOI: 10.3390/atmos13111767.
8. Zhong S., Yu Z., Zhu W. Study of the Effects of Air Pollutants on Human Health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2019. Vol. 16, No. 6. P. 1014. DOI: 10.3390/ijerph16061014.
9. Tian Y., Ma Y., Wu J. et al. Ambient PM2.5 Chemical Composition and Cardiovascular Disease Hospitalizations in China. *Environmental Science & Technology*. 2024. Vol. 58. P. 16327–16335. DOI: 10.1021/acs.est.4c03123.
10. Cohen A. J., Brauer M., Burnett R. et al. Estimates and 25-Year Trends of the Global Burden of Disease Attributable to Ambient Air Pollution. *The Lancet*. 2017. Vol. 389. P. 1907–1918. DOI: 10.1016/S0140-6736(17)30505-6.
11. Lippi M., Riva L., Caruso M., Punta C. Cellulose for the Production of Air-Filtering Systems: A Critical Review. *Materials*. 2022. Vol. 15. P. 976. DOI: 10.3390/ma15030976.
12. Bian Y., Wang S. J., Zhang L., Chen C. Influence of Fiber Diameter, Filter Thickness, and Packing Density on PM2.5 Removal Efficiency. *Building and Environment*. 2020. Vol. 170. P. 106628. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106628.
13. Han K. S., Lee S., Kim M. et al. Electrically Activated Ultrathin PVDF-TrFE Air Filter for High-Efficiency PM1.0 Filtration. *Advanced Functional Materials*. 2019. Vol. 29. P. 1903633. DOI: 10.1002/adfm.201903633.
14. Liu H., Zhang S. C., Liu L. F. et al. A Fluffy Dual-Network Structured Nanofiber/Net Filter Enables High-Efficiency Air Filtration. *Advanced Functional Materials*. 2019. Vol. 29. DOI: 10.1002/adfm.201901573.
15. Zhang J., Chen G., Bhat G. S. et al. Electret Characteristics of Melt-Blown Polylactic Acid Fabrics for Air Filtration Application. *Journal of Applied Polymer Science*. 2020. Vol. 137. P. 48309. DOI: 10.1002/app.48309.
16. Mingjun C., Youchen Z., Li H. et al. An Example of Industrialization of Melt Electrospinning: Polymer Melt Differential Electrospinning. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 2019. Vol. 2. P. 110–115. DOI: 10.1016/j.aiepr.2019.05.003.
17. Buivydiene D., Krugly E., Ciuzas D. et al. Formation and Characterisation of Air Filter Material Printed by Melt Electrospinning. *Journal of Aerosol Science*. 2019. Vol. 131. P. 48–63. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2019.01.004.
18. Zulfi A., Hapidin D. A., Munir M. M. et al. The Synthesis of Nanofiber Membranes from Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) Waste. *RSC Advances*. 2019. Vol. 9. P. 30741–30751. DOI: 10.1039/C9RA05635E.
19. Roche R., Yalcinkaya F. Electrospun Polyacrylonitrile Nanofibrous Membranes for Point-of-Use Water and Air Cleaning. *ChemistryOpen*. 2019. Vol. 8. P. 97–103. DOI: 10.1002/open.201800281.
20. Lu T., Cui J., Qu Q. et al. Multistructured Electrospun Nanofibers for Air Filtration: A Review. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2021. Vol. 13. P. 23293–23313. DOI: 10.1021/acsami.1c04723.
21. Li Y., Wang D., Xu G. et al. ZIF-8/PI Nanofibrous Membranes With High-Temperature Resistance. *Frontiers in Chemistry*. 2021. Vol. 9. P. 810861. DOI: 10.3389/fchem.2021.810861.
22. Ryu S., Kim D., Lee H. et al. Biodegradable Nanofiber/Metal-Organic Framework/Cotton Air Filtration Membranes. *Polymers*. 2023. Vol. 15. P. 3965. DOI: 10.3390/polym15193965.
23. Binaeian E., El-Sayed E.-S. M., Matikolaei M. K., Yuan D. Experimental strategies on enhancing toxic gases uptake of metal-organic frameworks. *Coordination Chemistry Reviews*. 2021. Vol. 430. P. 213738. DOI: 10.1016/j.ccr.2020.213738.
24. Zambrano M. C., Pawlak J. J., Venditti R. A. Effects of chemical and morphological structure on biodegradability of fibers, fabrics, and other polymeric materials. *BioResources*. 2020. Vol. 15. P. 9786. DOI: 10.15376/biores.15.4.9786-9807.
25. Li Z., Song J., Long Y. et al. Large-scale blow spinning of heat-resistant nanofibrous air filters. *Nano Research*. 2020. Vol. 13. P. 861–867. DOI: 10.1007/s12274-019-2603-3.

26. Hao Z., Wu J., Wang C., Liu J. Electrospun Polyimide/Metal-Organic Framework Nanofibrous Membrane with Superior Thermal Stability for Efficient PM2.5 Capture. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2019. Vol. 11. P. 11904–11909. DOI: 10.1021/acsami.9b00795.
27. Wang S., Zhao X., Yin X., Yu J., Ding B. Electret Polyvinylidene Fluoride Nanofibers Hybridized by Polytetrafluoroethylene Nanoparticles. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2016. Vol. 8. P. 23985–23994. DOI: 10.1021/acsami.6b07991.
28. Guo C.-H., Gao Y., Zhang C. et al. Multi-Scale Gradient Fiber Structure Hierarchical Flexible Ceramic Aerogel for High-Temperature Filtration. *Nanomaterials*. 2023. Vol. 13, No. 13. P. 1957. DOI: 10.3390/nano13131957.
29. Clark A. M., Fromen C. A. Role of flow rate on the deposition of aerosol particles in open-cell foam filters. *Aerosol Science and Technology*. 2021. Vol. 55, No. 10. P. 1146–1159. DOI: 10.1080/02786826.2021.1901234.
30. Hellmann M., Clark A. M., Fromen C. A. Influence of open-cell foam architecture on the pressure drop and filtration efficiency. *Journal of Aerosol Science*. 2021. Vol. 157. P. 105825. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2021.105825.
31. Yu Y., Zhang N., Hoffman D. et al. Design and Evaluation of 3D-Printed Lattice Structures as High Flow Rate Aerosol Filters. *ACS Applied Engineering Materials*. 2024. Vol. 2. P. 2875–2884. DOI: 10.1021/acsaem.4c00321.
32. Laengert S., Boies A. M., Hochgreb S. Effect of electrostatic charge on the filtration of aerosol particles in foam filters. *Journal of Aerosol Science*. 2020. Vol. 148. P. 105608. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2020.105608.
33. Inayat A., Schwerdtfeger J., Freund H. et al. Periodic open-cell foams: Pressure drop measurements and modeling of an idealized cell architecture. *Chemical Engineering Science*. 2016. Vol. 143. P. 372–381. DOI: 10.1016/j.ces.2015.12.042.
34. Kolewe E. L., Padhye S., Woodward I. R. et al. A Pediatric Upper Airway Library to Evaluate Interpatient Variability of In Silico Aerosol Deposition. *AAPS PharmSciTech*. 2023. Vol. 24, No. 6. P. 162. DOI: 10.1208/s12249-023-02515-3.
35. Pinho A. C., Morais P. V., Pereira M. F., Piedade A. P. Changes in the Antibacterial Performance of Polymer-Based Nanocomposites. *Polymers*. 2025. Vol. 17. P. 171. DOI: 10.3390/polym17010171.
36. Soe S., Stratakos A. C. An explorative study on the antimicrobial effects and mechanical properties of 3D printed PLA and TPU surfaces. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2023. Vol. 137. P. 105536. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2022.105536.
37. Petousis M., Vidakis N., Mountakis N. et al. Multifunctional Material Extrusion 3D-Printed Antibacterial Polylactic Acid (PLA) with Binary Inclusions. *Fibers*. 2022. Vol. 10. P. 52. DOI: 10.3390/fib10060052.
38. Vidakis N., Petousis M., Velidakis E. et al. Three-Dimensional Printed Antimicrobial Objects of Polylactic Acid (PLA)-Silver Nanoparticle Nanocomposite Filaments. *Biomimetics*. 2020. Vol. 5. P. 42. DOI: 10.3390/biomimetics5030042.
39. Car F., Zekić N., Vrsaljko D., Tomašić V. Innovative Production of 3D-Printed Ceramic Monolithic Catalysts for Oxidation of VOCs. *Catalysts*. 2025. Vol. 15, No. 2. P. 125. DOI: 10.3390/catal15020125.
40. Guan Z., Yang X., Liu P. et al. Additive manufacturing of zirconia ceramic by fused filament fabrication. *Ceramics International*. 2023. Vol. 49. P. 27742–27749. DOI: 10.1016/j.ceramint.2023.06.123.
41. Kilikevičienė K., Kačianauskas R., Rimša V., Kilikevičius A. Agglomeration of particulate matter in chimneys using acoustic flow. *Heliyon*. 2024. Vol. 10. P. e25306. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e25306.
42. Moldagulova A., Kalpeyeva Z., Uskenbayeva R. et al. IoT-Based Air Quality Monitoring with Adaptive Filtering and RPA-Based Decision Automation. 2026. DOI: 10.13140/RG.2.2.33451.21281.
43. Toma C., Alexandru A., Popa M., Zamfiroiu A. IoT Solution for Smart Cities' Pollution Monitoring and the Security Challenges. *Sensors*. 2019. Vol. 19, No. 15. P. 3401. DOI: 10.3390/s19153401.
44. Li J., Li X., Wang K., Cui G. Atmospheric PM2.5 Prediction Based on Multiple Model Adaptive Unscented Kalman Filter. *Atmosphere*. 2021. Vol. 12, No. 5. P. 607. DOI: 10.3390/atmos12050607.
45. Blom H. A. P., Bar-Shalom Y. The interacting multiple model algorithm for systems with Markovian switching coefficients. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1988. Vol. 33. P. 780–783. DOI: 10.1109/9.1299.
46. Zhou Q., Jiang H., Wang J., Zhou J. A hybrid model for PM2.5 forecasting based on ensemble empirical mode decomposition. *Science of The Total Environment*. 2014. Vol. 496. P. 264–274. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.07.074.
47. Sun W., Sun J. Daily PM2.5 concentration prediction based on principal component analysis and LSSVM. *Journal of Environmental Management*. 2017. Vol. 188. P. 144–152. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.11.078.

Дата першого надходження статті до видання: 30.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

ЕКОЛОГІЧНИЙ МЕНЕДЖМЕНТ

УДК 504.054:581.5:582.675.1
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.36

БІОІНДИКАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ *BUXUS SEMPERVIRENS* L. В СИСТЕМІ ЕКОЛОГІЧНОГО МЕНЕДЖМЕНТУ УРБОЛАНДШАФТІВ

Любінська Л.Г., Григорчук І.Д.
Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка
вул. Огієнка, 61, 32300, м. Кам'янець-Подільський,
kvitkolub@gmail.com, hryhorchuk@kpnu.edu.ua

У статті досліджено біоіндикаційні властивості *Buxus sempervirens* L. та обґрунтовано можливості його використання в системі екологічного менеджменту урболандшафтів. В умовах інтенсивної урбанізації та зростання антропогенного навантаження на природні компоненти міського середовища особливої актуальності набуває застосування біологічних методів оцінки якості довкілля, які дозволяють інтегрально відображати вплив комплексу екологічних чинників. Одним із перспективних напрямів є використання декоративних вічнозелених рослин як індикаторів стану урбанізованих екосистем. Метою дослідження є оцінка реакції *Buxus sempervirens* L. на дію урбаністичних стрес-факторів на основі аналізу морфометричних параметрів та життєздатності пилку. У роботі застосовано комплексний підхід, що поєднує вивчення вегетативних і генеративних характеристик рослин, що забезпечує більш повну оцінку їхнього функціонального стану в умовах трансформованого середовища. Встановлено, що під впливом антропогенного навантаження відбувається варіабельність морфологічних показників та зниження життєздатності пилку у *B. sempervirens*. Показано, що генеративні структури, зокрема пилок, є чутливими індикаторами ранніх змін у рослинному організмі та можуть використовуватися для оцінки екологічного стану територій. Запропоновано інтегрований підхід до біоіндикації, який передбачає поєднання морфометричних і репродуктивних показників. Зроблено висновок, що B. sempervirens можуть застосовуватися в екологічному моніторингу урбанізованих територій як доступний метод оцінки стану довкілля, а також в екологічному менеджменті. У майбутньому перспективними є розширення спектру індикаційних показників, порівняльні та сезонні дослідження, встановлення зв'язку із рівнем забруднення та інтеграція з фізико-хімічними методами. Водночас застосування B. sempervirens як біоіндикатора потребує уніфікації методичних підходів та обмежується впливом локальних факторів. *Ключові слова:* біоіндикація, антропогенне навантаження, *Buxus sempervirens* L., м. Кам'янець-Подільський.

Bioindicator Properties of *Buxus sempervirens* L. in the System of Environmental Management of Urban Landscapes. Lyubinska L., Hryhorchuk I.

The article examines the bioindicator properties of *Buxus sempervirens* L. and substantiates the possibilities of its use in the system of environmental management of urban landscapes. Under conditions of intensive urbanization and increasing anthropogenic pressure on the natural components of the urban environment, the application of biological methods for assessing environmental quality becomes especially relevant, as they allow for an integral reflection of the impact of a complex of ecological factors. One of the promising approaches is the use of ornamental evergreen plants as indicators of the state of urbanized ecosystems.

The aim of the study is to assess the response of *Buxus sempervirens* L. to urban stress factors based on the analysis of morphometric parameters and pollen viability. The research applies an integrated approach that combines the study of vegetative and generative plant characteristics, ensuring a more comprehensive assessment of their functional state under transformed environmental conditions.

It has been established that anthropogenic pressure causes variability in morphological traits and a decrease in pollen viability in *B. sempervirens*. It is shown that generative structures, particularly pollen, are sensitive indicators of early changes in the plant organism and can be used to assess the ecological state of territories. An integrated approach to bioindication is proposed, combining morphometric and reproductive indicators. It is concluded that *Buxus sempervirens* can be used in environmental monitoring of urbanized areas as an accessible method for assessing environmental quality, as well as in environmental management. Future prospects include expanding the range of indicator parameters, conducting comparative and seasonal studies, establishing relationships with pollution levels, and integrating with physicochemical methods. At the same time, the use of *Buxus sempervirens* as a bioindicator requires the unification of methodological approaches and is limited by the influence of local factors. *Key words:* bioindication, anthropogenic pressure, *Buxus sempervirens* L., Kamianets-Podilskyi.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток урбанізованих територій супроводжується інтенсивним антропогенним навантаженням, що проявляється у зростанні рівня забруднення атмосферного повітря, трансформації ґрунтового покриву та порушенні функціонування біотичних компонентів екосистем. Урболандшафти характеризуються підвищеними концентраціями полютантів, зокрема

© Любінська Л.Г., Григорчук І.Д., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

оксидів азоту, сірки, твердих частинок та важких металів, що формує стресові умови для рослинних організмів. У таких умовах особливої актуальності набуває проблема оцінки якості довкілля. На сьогоднішній день активно розвивається напрям біоіндикації, який базується на аналізі реакцій живих організмів на дію факторів середовища [2, 4]. Одними з найбільш інформативних біоіндикаторів є рослини, оскільки вони інтегрують вплив екологічних чинників упродовж тривалого часу. Особливе значення мають їхні репродуктивні структури, зокрема пилок, який є високочутливим до дії забруднювачів і може використовуватися для оцінки рівня техногенного навантаження [1, 5]. Доведено, що під впливом полютантів відбуваються морфологічні зміни пилкових зерен, зниження їх життєздатності та підвищення стерильності [8, 11].

Актуальність дослідження. Забруднення атмосферного повітря, за даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, є одним із провідних факторів ризику для здоров'я населення, особливо у великих містах, де концентрації твердих частинок та токсичних сполук перевищують допустимі норми. У цьому контексті зростає потреба у впровадженні ефективних підходів до екологічного моніторингу урболандшафтів [1]. Традиційні фізико-хімічні методи оцінювання якості довкілля, хоча й забезпечують точні кількісні показники, не відображають сумарного біологічного ефекту дії забруднювачів на живі організми [4]. Саме тому в сучасній екологічній науці активно розвиваються біоіндикаційні методи, які дозволяють оцінювати інтегральний вплив екологічних факторів на біоту. Вищі рослини, як біоіндикатори, здатні акумулювати полютанти та реагувати на них змінами морфологічних та фізіолого-біохімічних показників.

У системі екологічного менеджменту урбанізованих територій важливу роль відіграють декоративні деревно-чагарникові рослини, які одночасно виконують екосистемні функції (очищення повітря, зниження температури, акумуляція пилу) та можуть слугувати індикаторами стану середовища. Серед них Buxus sempervirens L. є одним із широко використовуваних видів у міському озелененні завдяки своїй стійкості до урбанізованих умов, довговічності та здатності витримувати інтенсивний антропогенний вплив [3, 14]. Попри це біоіндикаційний потенціал B. sempervirens залишається недостатньо вивченим. Тому розширення спектра біоіндикаторів урбанізованого середовища та розроблення науково обґрунтованих підходів до використання B. sempervirens у системі екологічного менеджменту міст є актуальним.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження біоіндикаційних властивостей *B. sempervirens* безпосередньо пов'язане з актуальними науковими та практичними завданнями сучасної екології, урбоекології та систем екологічного менеджменту. Результати дослідження доповнюють наукові уявлення про механізми адаптації рослин до умов урбанізованого середовища та розширюють спектр індикаторних видів для різних екологічних умов.

Практичне значення результатів дослідження полягають в удосконаленні системи екологічного моніторингу урболандшафтів, зокрема шляхом використання доступних біоіндикаторів замість або на доповнення до інструментальних методів; оптимізації асортименту зелених насаджень у містах з урахуванням їх індикаційного потенціалу; оцінки ефективності природоохоронних заходів через динаміку стану рослин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Buxus sempervirens L. у сучасних дослідженнях розглядається переважно як декоративний деревний вид, чутливий до комплексу біотичних та абіотичних чинників, що зумовлює його потенційне використання в екологічному моніторингу урболандшафтів [3]. Значна частина робіт присвячена вивченню декоративних та лікарських властивостей самшиту, а також патологічним процесам, що повязані з ураженням їх біологічними патогенами [7]. Так, було ідентифіковано збудника самшитової гнилі (Calonectria pseudonaviculata) та встановлено його філогенетичний статус, довівши високу чутливість Buxus до грибних патогенів і залежність розвитку хвороби від умов вологості та температури [10]. Це заклало підґрунтя для використання самшиту як індикатора фітопатологічного стану насаджень. Подальші дослідження поширення цього патогену в Європі підтвердили його швидку експансію в урбанізованих екосистемах, що корелює з антропогенним навантаженням та кліматичними змінами [6, 13].

Важливим напрямом досліджень є вивчення взаємодії самшиту з інвазійними шкідниками. Зокрема, вогнівка самшитова (*Cydalima perspectalis*) активно досліджується як фактор деградації самшитових насаджень [6]. Було показано, що поширення цього фітофага в Європі тісно пов'язане з потеплінням клімату, що дозволяє розглядати стан популяцій самшиту як індикатор біотичних змін у міському середовищі.

Водночас в сучасній науковій літературі B. sempervirens рідко розглядається як класичний біоіндикатор. Однак у межах екологічного підходу до біоіндикації може використовуватися як індикатор стану урбанізованого середовища через реакцію на патогени, шкідників і кліматичні зміни.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. З'ясовано що, незважаючи на значний обсяг робіт, присвячених використанню деревних і трав'янистих рослин у біоіндикації, питання застосування *B. sempervirens* як біоіндикатора залишається недостатньо розробленим. Наявні дослідження підтверджують його чутливість до абіотичних і біотичних факторів на фізіологічному, біохімічному

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

та популяційному рівнях, однак відсутні комплексні роботи, спрямовані на інтегральну оцінку його індикаційних властивостей у системі екологічного менеджменту урболандшафтів. Це визначає актуальність подальших досліджень у цьому напрямі.

Новизна. У представленому дослідженні вперше отримано та узагальнено результати щодо біоіндикаційного потенціалу *B. sempervirens* у системі екологічного менеджменту урболандшафтів, що дозволяє сформулювати такі положення наукової новизни:

– вперше обґрунтовано можливість використання *B. sempervirens* як комплексного біоіндикатора стану урбанізованого середовища, з урахуванням його морфологічних та репродуктивних характеристик;

– розроблено інтегрований підхід до біоіндикації, який поєднує аналіз вегетативних та генеративних ознак, що дозволяє підвищити точність оцінювання антропогенного навантаження;

– вперше встановлено діагностичну цінність показників життєздатності пилку та репродуктивного успіху *B. sempervirens* як ранніх індикаторів впливу урбаністичних стрес-факторів;

– запропоновано практично орієнтовану модель інтеграції біоіндикаційних показників *B. sempervirens* у систему екологічного менеджменту урбанізованих територій, що може бути використана для моніторингу та планування зелених насаджень.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічне значення дослідження полягає у розширенні та поглибленні підходів до біоіндикації стану урбанізованого середовища шляхом обґрунтування комплексного використання декоративних вічнозелених видів, зокрема *B. sempervirens*, як індикаторів антропогенного навантаження.

Загальнонаукове значення дослідження полягає у розвитку концепції фітоіндикації через залучення інтродукованих декоративних видів до системи екологічного моніторингу урболандшафтів, що розширює традиційне коло біоіндикаторів; поглиблені уявлень про чутливість генеративних структур рослин до дії техногенних факторів, зокрема використання пилку як раннього індикатора екологічного стресу; інтеграції біологічних і екологічних підходів у дослідженні урбанізованих екосистем, що відповідає сучасній парадигмі міждисциплінарних досліджень.

Методологічне значення дослідження полягає у можливості обґрунтовувати вибір рослин для озеленення з урахуванням їх індикаторних властивостей та використовувати біоіндикаційні показники як інструмент оцінки якості довкілля.

Виклад основного матеріалу. Оцінка біоіндикаційних властивостей B. sempervirens здійснювалася на основі аналізу морфометричних та репродуктивних показників, що відображають різні рівні організації рослинного організму та ступінь його реакції на антропогенне навантаження. Для біоіндикаційної оцінки B. sempervirens обрали дві пробні площі (ПП) у межах м. Кам'янця-Подільського, що відрізнялися антропогенним навантаженням: ПП 1 – Ботанічний сад ЗВО «Подільський державний університет»; ПП 2 – вул. Князів Коріатовичів. ПП 1 прийняли за умовний контроль, оскільки ділянка знаходиться на значній відстані від промислових об'єктів та характеризується низькою інтенсивністю автомобільного руху (в середньому 67 транспортних одиниць / год). ПП 2 – це вулиця зі значним транспортним навантаженням (675 од / год), що дозволяє припускати про посилене антропогенне навантаження на навколишнє середовище. Морфометричні показники (довжина та ширина листка, довжина пагона) визначали за загальноприйнятими методиками. Стерильність пилкових зерен аналізували йодним методом [5].

Рівень стерильності пилку визначали за формулою:

$$M = \frac{G}{N} \times 100\ \%$$

де: M – рівень стерильності пилку (%); G – кількість стерильних пилкових зерен; N – кількість досліджених пилкових зерен [5].

Статистичну обробку даних проводили з використанням пакета прикладних програм «Microsoft Excel 2000».

Отримані результати свідчать про чітку тенденцію до зменшення лінійних параметрів вегетативних органів B. sempervirens в умовах урбанізованого середовища (табл. 1). Зокрема, встановлено зниження середніх значень ширини та довжини листкової пластинки, а також довжини однорічних пагонів.

Таблиця 1

Морфометричні показники *Buxus sempervirens* L. в умовах різного антропогенного навантаження м. Кам'янця-Подільського, M ± m, см

Показник	ПП 1 Ботанічний сад (контроль)	ПП 2 вул. Князів Коріатовичів
Ширина листка, см	1,3 ± 0,1	0,9 ± 0,01
Довжина листка, см	2,7 ± 0,1	2,3 ± 0,1
Довжина пагона, см	6,8 ± 0,2	4,3 ± 0,2

Такі зміни можуть бути інтерпретовані в межах класичного екологічного підходу як прояв пригнічення ростових процесів під впливом несприятливих факторів середовища, зокрема забруднення повітря, ущільнення ґрунту та дефіциту вологи. Зменшення площі листкової поверхні може розглядатися як адаптивна реакція, спрямована на зниження транспіраційних втрат та обмеження надходження полютантів.

З позицій екофізіологічного підходу, подібні морфометричні зміни є наслідком порушення клітин-

ного поділу та розтягування, що може бути пов'язано з токсичним впливом забруднюючих речовин.

Водночас слід враховувати, що морфометричні показники є відносно інертними та можуть відображати вже сформовану відповідь рослини на тривалий вплив факторів, тобто мають обмежену чутливість для ранньої діагностики.

Аналіз фертильності пилку B. sempervirens (табл. 2) показав суттєве зростання частки стерильних пилкових зерен в умовах урбанізованої зони порівняно з контрольною ділянкою. Це свідчить про негативний вплив антропогенних факторів на репродуктивну систему рослин.

Підвищення стерильності пилку пов'язують із порушеннями мейотичного поділу, пошкодженням ДНК та дестабілізацією клітинних структур під впливом полютантів. Формування стерильного пилку, як правило, є наслідком збоїв під час мейозу та мікроспорогенезу, що проявляється дегенерацією ядер, цитоплазми або цілих клітин [9]. Відомо також, що екологічний стрес, зокрема дія токсикантів, може викликати асинхронність розвитку чоловічого гаметофіта та мейотичну нестабільність, що безпосередньо впливає на зниження фертильності пилку . На молекулярному рівні порушення процесів рекомбінації та утворення розривів ДНК у мейозі можуть призводити до генетичних аномалій і формування нефункціональних гамет [12].

Таблиця 2

Стерильність пилкових зерен *Buxus sempervirens* L. в умовах різного антропогенного навантаження м. Кам'янця-Подільського, M ± m, %

Територія дослідження	Рівень стерильності пилкових зерен, %
ПП 1 Ботанічний сад – контроль	5,6±0,1
ПП 2 вул. Князів Коріатовичів	23,4±1,9

Пилок, як високочутлива структура, швидко реагує на зміни середовища, що робить його ефективним індикатором навіть незначних рівнів забруднення. Показано, що під впливом забруднення змінюються морфологічні, фізіологічні та біохімічні характеристики пилку, включаючи життєздатність і частоту аномалій розвитку. Зокрема, збільшення частки стерильного та тератоморфного пилку прямо корелює з рівнем антропогенного навантаження та наявністю важких металів і газових викидів [11]. Припускаємо, що саме показники фертильності пилку можуть бути найбільш інформативними для ранньої діагностики стану урбанізованого середовища, оскільки відображають початкові порушення на клітинному рівні до появи видимих морфологічних змін. Це узгоджується з даними про те, що репродуктивні структури рослин є одними з найбільш чутливих до дії полютантів, а зниження життєздатності пилку є одним із ранніх проявів стресу, спричиненого забрудненням повітря [9].

Отримані результати дозволяють виділити наступні взаємопов'язані рівні біоіндикації у B.sempervirens: структурний, що характеризує інтенсивність ростових процесів і відображає довготривалу адаптацію до умов середовища та функціональний, що відображає стабільність клітинних і генетичних процесів.

З позицій системного підходу в екологічному менеджменті, поєднання цих рівнів дозволяє отримати більш повну картину стану урболандшафтів, ніж використання окремих показників. Це створює передумови для розробки багаторівневих систем моніторингу, в яких кожен показник виконує свою функцію.

Головні висновки.

1. B. sempervirens є чутливим індикатором антропогенного навантаження в урбанізованому середовищі.

2. У рослин урбанізованої зони встановлено зменшення морфометричних показників B. sempervirens, що відображає пригнічення ростових процесів під впливом факторів середовища.

3. Зростання частки стерильного пилку B. sempervirens свідчить про порушення репродуктивних процесів і є найбільш чутливим показником ранніх змін довкілля.

4. Використання морфометричних та фізіологічних показників забезпечує комплексну оцінку стану урболандшафтів.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати дослідження біоіндикаційних властивостей B. sempervirens можуть застосовуватися в екологічному моніторингу урбанізованих територій як доступний метод оцінки стану довкілля, а також в екологічному менеджменті. У науковому аспекті перспективними є розширення спектру індикаційних показників, порівняльні та сезонні дослідження, встановлення зв'язку із рівнем забруднення та інтеграція з фізико-хімічними методами. За результатами подальшого підтвердження отриманих даних вид може розглядатися як індикаторний для екологічного моніторингу в умовах помірного клімату. Водночас його застосування обмежується впливом локальних факторів та потребує уніфікації методичних підходів.

Література

1. Бессонова В. П., Бессонов Є. П., Зверковський В. М. Оцінка стану пилку деревних рослин в урбатехногенній екосистемі. *Питання біоіндикації та екології*. 2013. Вип. 18, № 1. С. 1–15.

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

2. Гришко В. М., Комарова І. О. Біоіндикація атмосферного забруднення за реакцією пилкових зерен *Taraxacum officinale* F.H. Wigg (на прикладі м. Кривий Ріг). *Scientific Journal «ScienceRise».* 2016. Т. 5/1 (22). URL: https://doi.org/10.15587/2313-8416.2016.69276
3. М'ялковський Р. О., Панцирева Г. В., Безвіконний П. В., Потапський Ю. В., Петрище О. І., Лобунько Ю. В. Удосконалення агротехніки вирощування садивного матеріалу *Buxus sempervirens* L. в умовах Поділля. *Наукові доповіді НУБіП України*. 2023. № 4/104. URL: https://doi.org/10.31548/dopovidi4(104).2023.010
4. Парпан В. І., Миленька М. М. Методологічні аспекти оцінки екологічного стану урбанізованих і техногенно змінених територій. *Вісник Дніпропетровського університету. Біологія. Екологія.* 2010. Вип. 18, Т. 2. С. 61–68.
5. Швець Л. С. Біоіндикація інтенсивності забруднення довкілля за показниками фертильності пилкових зерен різних рослин. *Досягнення біології та медицини*. 2011. № 1 (17). С. 41–44.
6. Ferracini C, Pogolotti C, Mancardi P, Miglio M, Bonelli S, Barbero F. The Box Tree Moth: An Invasive Species Severely Threatening *Buxus* Natural Formation in NW Italy. *Forests*. 2022. Vol. 13 (2). P. 178. URL: https://doi.org/10.3390/f13020178
7. Henricot B., Culham A. *Cylindrocladium buxicola*, a new species affecting *Buxus* spp., and its phylogenetic status. Mycologia. 2002. Vol. 94 (6). P. 980–997.
8. Kalbande DM, Dhadse SN, Chaudhari PR, Wate SR. Biomonitoring of heavy metals by pollen in urban environment. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2008. Vol. 138. P. 233–238. URL: DOI: 10.1007/s10661-007-9793-0
9. Khan N. B., Ch. Soumya, Basak G., Sarkar P., Singh V. K., Adit A., Barman Ch. Impact of air pollution on reproductive biology of plants: Mechanisms and consequences. *Plant Stress*. 2025. Vol. 18, P. 101–119. URL: https://doi.org/10.1016/j.stress.2025.101119
10. Malapi-Wight M, Hébert JB, Buckley R, Daughtrey ML, Gregory NF, Rane K, Tirpak S, Crouch JA. First Report of Boxwood Blight Caused by *Calonectria pseudonaviculata* in Delaware, Maryland, New Jersey, and New York. *Plant Dis*. 2014 Vol. 98 (5). P.698.
11. Selvaggi R, Tedeschini E, Pasqualini S, Moroni B, Petroselli C, Cappelletti D. A New Technique for the Passive Monitoring of Particulate Matter: Olive Pollen Grains as Bioindicators of Air Quality in Urban and Industrial Areas. *Applied Sciences.* 2023. Vol. 13(17). P. 9541. URL: https://doi.org/10.3390/app13179541
12. Stevanovic K, Sinkkonen A, Pawankar R, Zuberbier T. Urban Greening and Pollen Allergy: Balancing Health and Environmental Sustainability. *J. Allergy Clin. Immunol. Pract.* 2025. Vol. 13 (2). P. 275–279. DOI: 10.1016/j.jaip.2024.12.017
13. Varol, T., Canturk, U., Cetin, M. *et al.* Identifying the suitable habitats for Anatolian boxwood (*Buxus sempervirens* L.) for the future regarding the climate change. *Theoretical and Applied Climatology.* 2022. Vol. 150. P. 637–647. URL: https://doi.org/10.1007/s00704-022-04179-1
14. Vikhe A.D. Vikhe S.L. Phytochemical Analysis Of *Buxus Sempervirens* L. Leaf Methanolic Extract. *World Journal of Pharmaceutical Research*. 2025. Vol. 14 (2). P. 901–909.

Дата першого надходження статті до видання: 09.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 502.175:712.23
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.37

СЦЕНАРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СТАНУ ТЕРИТОРІЙ ПРИРОДНО-ЗАПОВІДНОГО ФОНДУ ЯК ІНСТРУМЕНТ ЕКОЛОГІЧНОГО УПРАВЛІННЯ

Тарасюк М.В.
Національний транспортний університет
вул. Михайла Омеляновича-Павленка, 1, 01010, м. Київ
officenttn@gmail.com

У статті досліджується сценарне моделювання як методологічний інструмент прогнозування та управління екологічним станом територій природно-заповідного фонду (НПП) в умовах зростаючого антропогенного навантаження, ресурсної обмеженості та воєнно-екологічних загроз, актуальних для сучасної України. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю переходу від описових до формалізованих, науково обґрунтованих підходів до обґрунтування природоохоронних технологічних рішень – підходів, здатних системно враховувати варіативність зовнішніх впливів і прогнозувати наслідки різних управлінських стратегій для стану заповідних екосистем.

У роботі запропоновано системну модель сценарного розвитку стану НПП, яка формалізує зв'язок між антропогенним навантаженням, природоохоронними технологіями та прогнозованим екологічним результатом у вигляді відображення $S : T \times П \rightarrow E$. Модель структурує заповідну екосистему через три взаємопов'язані підсистеми: підсистему зовнішніх впливів (антропогенні та природні чинники навантаження), підсистему управління (заходи охорони та відновлення) та підсистему екологічного стану (поточний і прогнозований стан НПП).

На основі параметричного аналізу виділено три базові сценарії: базовий (стабільний помірний тиск, незмінний режим охорони, задовільний прогноз на 10 років), деградації (зростаючий тиск, послаблений режим охорони, незадовільний прогноз) та відновлення (зниження тиску, посилений режим охорони, активне впровадження природоохоронних технологій, добрий або відмінний прогноз). Кожен сценарій параметрично охарактеризовано за вісьмома показниками: рівнем антропогенного тиску, режимом охорони, впровадженням природоохоронних технологій, станом біорізноманіття, площею деградованих екотопів, характером відновлення порушених ділянок, рівнем фінансування та прогнозованим екологічним станом.

Для систематизації управлінських альтернатив застосовано метод морфологічного аналізу. Побудовано морфологічну матрицю, що включає шість ключових ознак: тип антропогенного тиску (рекреаційний, господарський, військовий, комбінований), режим охорони, тип природоохоронної технології, масштаб і тривалість відновлювальних заходів, а також характер впливу на екосистему. Наукова новизна роботи полягає, зокрема, у включенні воєнного типу антропогенного тиску як самостійної морфологічної ознаки, що відповідає реаліям функціонування НПП України в умовах збройного конфлікту.

Морфологічний простір управлінських рішень формалізовано як декартовий добуток множин значень виділених ознак, що дозволяє систематично впорядкувати сукупність допустимих сценарних альтернатив і підготувати методологічний перехід до їх кількісного оцінювання засобами багатокритеріального аналізу. Розроблена модель є адаптованою для різних типів природоохоронних об'єктів і може слугувати основою для обґрунтування вибору типу, масштабу та тривалості природоохоронних технологій в умовах невизначеності та ресурсних обмежень. *Ключові слова:* природно-заповідний фонд, сценарне моделювання, екологічний стан, морфологічний аналіз, багатокритеріальна оцінка, управлінські рішення, природоохоронні технології.

Scenario modelling of nature reserve fund territories as an environmental management tool. Tarasiuk M.

The article investigates scenario modelling as a methodological tool for forecasting and managing the ecological condition of nature reserve fund (NRF) territories under conditions of increasing anthropogenic pressure, limited resource availability, and military-ecological threats – challenges of particular relevance to contemporary Ukraine. The study is motivated by the need to transition from descriptive to formalised, scientifically grounded approaches for justifying conservation technology decisions – approaches capable of systematically accounting for the variability of external impacts and predicting the consequences of different management strategies for the condition of protected ecosystems.

The paper proposes a system model of scenario development for NRF condition, which formalises the relationship between anthropogenic pressure, conservation technologies, and the predicted ecological outcome as a mapping $S : T \times П \rightarrow E$. The model structures the protected ecosystem through three interrelated subsystems: the external impact subsystem (anthropogenic and natural pressure factors), the management subsystem (protection and restoration measures), and the ecological condition subsystem (current and projected NRF status).

Based on parametric analysis, three baseline scenarios are identified: the baseline scenario (moderate stable pressure, unchanged protection regime, satisfactory 10-year prognosis), the degradation scenario (increasing pressure, weakened protection regime, unsatisfactory prognosis), and the restoration scenario (decreasing pressure, strengthened protection regime, active implementation of conservation technologies, good or excellent prognosis). Each scenario is parametrically characterised across eight indicators: anthropogenic pressure level, protection regime, implementation of conservation technologies, biodiversity condition, area of degraded ecotopes, character of disturbed site restoration, funding level, and projected ecological condition.

© Тарасюк М.В., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

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

To systematise management alternatives, morphological analysis was applied. A morphological matrix was constructed encompassing six key attributes: type of anthropogenic pressure (recreational, economic, military, combined), protection regime, type of conservation technology, scale and duration of restoration measures, and character of ecosystem impact. The scientific novelty of the study includes, in particular, the incorporation of the military type of anthropogenic pressure as an independent morphological attribute – a contribution that reflects the operational realities of Ukrainian NRF territories under conditions of armed conflict.

The morphological space of management decisions is formalised as the Cartesian product of the value sets of the identified attributes, enabling systematic ordering of the full set of admissible scenario alternatives and providing a methodological transition to their quantitative evaluation using multi-criteria analysis methods. The developed model is adaptable to various types of conservation objects and can serve as a foundation for justifying the selection of type, scale, and duration of conservation technologies under conditions of uncertainty and resource constraints. *Key words:* nature reserve fund, scenario modelling, ecological condition, morphological analysis, multi-criteria assessment, management decisions, conservation technologies, military-ecological threats.

Постановка проблеми. Сучасні природно-заповідні території України функціонують в умовах зростаючого антропогенного навантаження, загострення воєнно-екологічних загроз та недостатнього ресурсного забезпечення природоохоронної діяльності [1]. У такому контексті ефективне управління екологічним станом НПП вимагає не лише фіксації поточних змін, а й науково обґрунтованого прогнозування траєкторій їх розвитку. Сценарне моделювання як методологічний підхід дозволяє формалізувати варіативність можливих управлінських рішень і передбачити їх наслідки для стану екосистем заповідних об'єктів.

Актуальність дослідження. Актуальність дослідження зумовлена потребою у розробці формалізованих інструментів обґрунтування вибору природоохоронних технологій для охорони та відновлення територій і об'єктів природно-заповідного фонду в умовах складної екологічної та воєнно-екологічної ситуації в Україні. Традиційні підходи до застосування природоохоронних технологій на заповідних територіях не забезпечують системного прогнозування їх ефективності залежно від характеру та інтенсивності зовнішніх впливів, що обумовлює необхідність застосування сценарного підходу як методологічної основи для технологічного обґрунтування природоохоронних рішень.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Представлене дослідження відповідає актуальним науковим і практичним завданням у сфері технологій захисту навколишнього середовища через розробку формалізованих інструментів обґрунтування природоохоронних технологічних рішень для заповідних територій. В науковому вимірі сценарна модель стану НПП розширює методологічний апарат оцінювання ефективності природоохоронних технологій шляхом їх системної класифікації та прогнозування наслідків застосування за різних умов антропогенного навантаження. У практичному вимірі результати дослідження безпосередньо спрямовані на вирішення завдань із застосування природоохоронних технологій для охорони та відновлення територій і об'єктів природно-заповідного фонду, оскільки розроблена сценарна модель дозволяє обґрунтовано обирати тип, масштаб і тривалість технологічних заходів залежно від характеру антропогенного та воєнно-екологічного впливу на заповідну територію.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання сценарного моделювання екологічного стану природних територій висвітлено у працях вітчизняних і зарубіжних дослідників. Зокрема, системний підхід до управління заповідними екосистемами розглядається у роботах з екологічного менеджменту та стратегічного планування охорони природи. Методологічні підходи до структурування управлінських альтернатив у природно-заповідному фонді базуються на поєднанні експертних, аналітичних та сценарних методів, що підтверджується сучасними дослідженнями [2, 3]. Сценарне моделювання змін землекористування та рослинного покриву для оцінки екологічних і соціально-економічних наслідків у біосферних резерватах застосовано у дослідженнях Північно-Відземського біосферного резервату (Латвія) [4]. Для підвищення адаптивного потенціалу відновлення екосистем в умовах кліматичних змін, надмірної експлуатації ресурсів і політичної нестабільності запропоновано підхід, що передбачає роботу з наявною системою, створення самовідтворювальних адаптивних систем та залучення різноманітних учасників [5]. Для максимізації відновлення біорізноманіття після колапсу екосистем запропоновано мережеві стратегії реінтродукції видів на основі топологічних характеристик взаємодії [6]. Водночас питання формалізації морфологічного простору технологічних рішень для заповідних територій із урахуванням воєнно-екологічних загроз залишається недостатньо розробленим.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Незважаючи на наявні дослідження у сфері екологічного управління природно-заповідними територіями, поза увагою залишаються питання: формалізованого опису морфологічного простору управлінських рішень для НПП; системної інтеграції сценарного і морфологічного підходів як методологічного підґрунтя для багатокритеріальної оцінки альтернатив; врахування воєнно-екологічних чинників у структурі сценарних параметрів. Саме цим аспектам присвячена дана стаття.

Новизна. Наукова новизна дослідження полягає у розробці системної моделі сценарного розвитку стану НПП, що формалізує зв'язок між антропоген-

ним навантаженням, природоохоронними технологіями та прогнозованим екологічним результатом, а також побудові морфологічної матриці параметрів сценарної моделі, яка включає воєнний тип антропогенного тиску як окрему морфологічну ознаку.

Методологічне або загальнонаукове значення. Запропонований підхід поєднує системний аналіз, сценарне прогнозування та морфологічний аналіз у єдину методологічну схему, яка може застосовуватися для дослідження управлінських рішень у природоохоронній сфері. Формалізація морфологічного простору управлінських рішень забезпечує методологічний перехід від якісного опису сценаріїв до кількісної оцінки альтернатив засобами багатокритеріального аналізу. Розроблені методологічні рішення можуть бути адаптовані для інших типів природоохоронних об'єктів та екологічних задач, що потребують структурованого аналізу альтернатив в умовах невизначеності.

Викладення основного матеріалу. У межах даного дослідження сценарне моделювання стану територій та об'єктів природно-заповідного фонду розглядається як інструмент прогнозування змін екологічного стану НПП залежно від набору управлінських заходів і зовнішніх чинників. Відповідно, сценарне моделювання трактується як формалізоване подання зв'язку між умовами антропогенного навантаження, характером природоохоронних заходів та прогнозованим станом екосистем заповідної території.

Для побудови загальної системної моделі сценарного розвитку стану НПП виділяються основні структурні елементи, що визначають формування та просторовий прояв змін екологічного стану. До таких елементів зокрема належать антропогенне навантаження на заповідну територію, система природоохоронних заходів і технологій та стан екосистем НПП як об'єкта впливу; прогнозований екологічний результат [7].

Досліджуючи динаміку стану заповідних екосистем з точки зору системного підходу, доцільно виділити основні підсистеми: підсистему зовнішніх впливів, що охоплює антропогенні та природні чинники навантаження; підсистему управління, яка відображає заходи охорони та відновлення; підсистему екологічного стану, що характеризує поточний і прогнозований стан екосистем НПП [5, 8, 9].

Побудована системна модель у загальному вигляді може бути подана у вигляді відображення:

$$S : T \times П \rightarrow E, \quad (1)$$

де T – множина управлінських заходів та природоохоронних технологій;

$П$ – просторова область НПП з притаманними їй екосистемними характеристиками;

E – вихідна величина, що відображає прогнозований екологічний стан заповідної території.

Вихідна величина системної моделі відображає інтегральний результат дії управлінських заходів і зовнішніх чинників та визначається залежністю:

$$E = S\,(T, П) \quad (2)$$

Множина управлінських параметрів T у загальному вигляді може бути подана як:

$$T = \{t_1, t_2, \ldots, t_n\}, \quad (3)$$

де t_i – окремий захід або технологія, що впливає на формування екологічного стану НПП.

Побудована системна модель дозволяє розглядати різні сценарії управління заповідною територією за єдиною схемою: від характеру антропогенного навантаження та набору природоохоронних заходів до прогнозованого стану екосистем.

Для формалізації закономірностей сценарного розвитку стану НПП проведено параметричний аналіз виділених підсистем [10-13]. Результати параметричного аналізу підсистем узагальнено у таблиці 1, у якій наведено функціональне призначення сценаріїв, їх зміст та основні параметри.

Проведений параметричний аналіз свідчить, що визначальним елементом сценарної моделі є підсистема управлінських заходів, параметри якої безпосередньо формують закономірності зміни екологічного стану заповідних екосистем. Саме відмінності у наборі природоохоронних технологій та режимі охорони зумовлюють принципово різні траєкторії розвитку стану НПП за однакових зовнішніх умов.

Для систематизації результатів параметричного аналізу та формування методологічного переходу від опису сценаріїв до множини технічно можливих управлінських рішень застосовано метод морфологічного аналізу. Метод морфологічного аналізу дозволяє структурувати систему шляхом виділення основних морфологічних ознак, визначення можливих варіантів реалізації кожної з них та аналізу допустимих комбінацій параметрів у межах сценарної моделі [14-16].

На основі проведеного параметричного аналізу виділено ключові морфологічні ознаки, які визначають варіативність сценарного розвитку стану заповідних територій. Результати морфологічного аналізу узагальнено у морфологічній матриці (табл. 2).

Виділені морфологічні ознаки сценарної системи можуть бути формально подані у вигляді множини:

$$Z = \{z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, z_6\}, \quad (4)$$

де кожен елемент z_i відповідає окремій морфологічній ознаці, наведеній у таблиці 2.

Кожна морфологічна ознака характеризується множиною допустимих значень:

$$z_i = \{z_{i1}, z_{i2}, \ldots, z_{ik}\}. \quad (5)$$

Тоді морфологічний простір управлінських рішень у межах сценарної моделі стану НПП може бути поданий у вигляді декартового добутку:

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

Таблиця 1

Параметричний аналіз сценаріїв стану територій природно-заповідного фонду

Параметр сценарію	Сценарій 1 (Базовий)	Сценарій 2 (Деградація)	Сценарій 3 (Відновлення)
Антропогенний тиск на територію НПП	Помірний, стабільний	Зростаючий	Знижується
Режим охорони	Існуючий (незмінний)	Послаблений	Посилений
Впровадження природоохоронних технологій	Відсутнє	Відсутнє	Активне впровадження
Стан біорізноманіття	Стабільний	Погіршується	Покращується
Площа деградованих екотопів	Незмінна	Зростає	Скорочується
Відновлення порушених ділянок	Часткове, стихійне	Відсутнє	Планове, системне
Фінансування природоохоронних заходів	Базовий рівень	Недостатнє	Розширене
Прогнозований екологічний стан (10 років)	Задовільний	Незадовільний	Добрий / відмінний

Таблиця 2

Морфологічна матриця параметрів сценарної моделі стану НПП

№	Морфологічна ознака	Варіанти реалізації
1	Тип антропогенного тиску на НПП	рекреаційний; господарський; військовий; комбінований
2	Режим охорони заповідної території	суворий заповідний; регульований; буферний; без обмежень
3	Тип природоохоронної технології	біотехнічна; інженерно-екологічна; моніторингова; комплексна
4	Масштаб відновлювальних заходів	локальний (ділянка); зональний (кластер); системний (вся територія НПП)
5	Тривалість реалізації заходів	короткострокова (до 3 років); середньострокова (3–10 років); довгострокова (понад 10 років)
6	Характер впливу на екосистему	оборотний; частково оборотний; незворотній

$$M = z_1 \times z_2 \times z_3 \times z_4 \times z_5 \times z_6. \quad (6)$$

Множина M охоплює всі допустимі комбінації морфологічних ознак, які відповідають потенційним сценаріям управління заповідною територією. Кожна окрема сценарна альтернатива A_k визначається як поєднання конкретних значень морфологічних ознак і може бути подана у вигляді морфологічної формули:

$$A_k = (z_{1i} \wedge z_{2j} \wedge z_{3l} \wedge z_{4m} \wedge z_{5n} \wedge z_{6p}), \quad (7)$$

де $zq_i \in zq$ – допустиме значення відповідної морфологічної ознаки.

Таким чином, кожна сценарна альтернатива відповідає одному елементу морфологічного простору M та характеризується унікальною комбінацією параметрів антропогенного навантаження, режиму охорони і природоохоронних технологій.

Проведений морфологічний аналіз дозволяє системно впорядкувати множину можливих сценаріїв управління НПП. Морфологічний аналіз не передбачає вибору єдиного оптимального сценарію, а створює методологічну основу для подальшого оцінювання та порівняння альтернативних управлінських рішень із застосуванням методів багатокритеріального аналізу.

Висновки. 1. Розроблено системну модель сценарного розвитку стану НПП, що формалізує зв'язок між антропогенним навантаженням, природоохоронними технологіями та прогнозованим екологічним результатом у вигляді відображення $S : T \times П \rightarrow E$.

2. Виділено три базові сценарії управління заповідною територією – базовий, деградації та відновлення, – параметрично охарактеризовані через ключові показники стану екосистем і природоохоронного режиму.

3. Побудовано морфологічну матрицю параметрів сценарної моделі, що включає шість ключових морфологічних ознак із відповідними варіантами реалізації, у тому числі воєнний тип антропогенного тиску як самостійну ознаку.

4. Морфологічний простір управлінських рішень формалізовано як декартовий добуток множин значень морфологічних ознак, що забезпечує системне впорядкування допустимих сценарних альтернатив.

Перспективи використання результатів дослідження. Розроблена сценарна модель і морфологічна матриця можуть бути використані як методологічна основа для: подальшого кількісного оцінювання сценарних альтернатив засобами

багатокритеріального аналізу при обґрунтуванні вибору природоохоронних технологій для заповідних територій; обґрунтування типу, масштабу і тривалості технологічних заходів з охорони та відновлення НПП залежно від характеру антропогенного та воєнно-екологічного впливу; проведення порівняльного аналізу ефективності природоохоронних технологій за різних сценарних умов із метою вибору оптимальних рішень для конкретних об'єктів природно-заповідного фонду; формування науково обґрунтованих рекомендацій щодо пріоритизації природоохоронних технологій в умовах обмеженого ресурсного забезпечення, зокрема в умовах воєнно-екологічних загроз.

Література

1. Коляда О. В., Головань Л. В., Чуприна Ю. Ю., Бузіна І. М. Оцінка сучасного стану природно-заповідного фонду Харківської області в умовах воєнних викликів та інтеграції до європейського екологічного простору. *Екологічні науки.* 2025. № 6(63). С. 242–247. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.6-63.38
2. Pokshevnytska T., Khrutba Y. Optimisation of decision-making on risk management strategy for the hydromelioration systems in biosphere reserves. *Environmental Research Communications.* 2024. № 6, 091003. DOI: https://doi.org/10.1088/2515-7620/ad75ef.
3. Бондар О. І., Шевченко Р. Ю. Аудит контенту аншлагів природно-заповідних територій України та їх SMART-ресурсів. *Екологічні науки*. 2024. № 6(57). DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.6-57.1.
4. Krumins J and Klavins M (2025) Scenario-based modeling of land-use and land-cover changes to promote sustainability in biosphere reserves: a case study from North Vidzeme, Latvia. *Frontiers in Remote Sensing*. 6:1567002. DOI: https://doi.org/10.3389/frsen.2025.1567002.
5. Fritsch M., Loos J., Löhr K., Sieber S., Fischer J. Future-proofing ecosystem restoration through enhancing adaptive capacity. *Communications Biology*. 2023. №6. 377. DOI: https://doi.org/10.1038/s42003-023-04736-y.
6. Bhatia U, Dubey S, Gouhier TC, Ganguly AR. Network-based restoration strategies maximize ecosystem recovery. *Communications Biology.* 2023. № 6. 1256. DOI: https://doi.org/10.1038/s42003-023-05622-3.
7. Barabash O., Khrutba O., Pokshevnytska T., Tarasiuk M. The realisation of sustainable development goals through the implementation of international environmental projects with the implementation of transport infrastructure solutions. Intelligent transport systems: Ecology, safety, comfort (ITSESQC 2024) / eds. O. Slavinska, V. Danchuk, O. Kunytska, O. Hulchak. Cham: Springer, 2025. Vol. 1335. P. 14–28. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-87376-8_2
8. Bryce K., Hunter K. L. Enhancing climate change planning and adaptive management in marine protected areas through targets, thresholds, and social-ecological objectives. *Frontiers in Marine Science*. 2024. № 11. DOI: https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1339871.
9. Ellis J. I. et al. Scale and ecosystem-based management: Navigating mismatches between socio-ecological systems. Biological Conservation. 2025. № 302. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biocon.2025.111000.
10. Coro G., Bove P., Kesner-Reyes K. Global-scale parameters for ecological models. *Scientific Data*. 2023. № 10. Article 7. DOI: https://doi.org/10.1038/s41597-022-01904-3
11. Arias A., Moreira M. T., Heijungs R., Cucurachi S. Advancing parametric life cycle assessment (pa-LCA): A systematic review and methodological roadmap. *Sustainable Production and Consumption*. 2025. №61. P. 231-246 DOI: https://doi.org/10.1016/j.spc.2025.10.016.
12. Mevenkamp H., Wunderling N., Bhatt U., Carman T., Donges J. F., Genet H., Serbin S., Winkelmann R., Euskirchen E. S. Reducing uncertainty of high-latitude ecosystem models through identification of key parameters. *Environmental Research Letters*. 2023. № 18 084032. DOI: https://doi.org/10.1088/1748-9326/ace637.
13. Umwali E. D., Chen X., Ma X., Guo Z., Mbigi D., Zhang Z., Umugwaneza A., Gasirabo A., Umuhoza J. Integrated SSP-RCP scenarios for modeling the impacts of climate change and land use on ecosystem services in East Africa. *Ecological Modelling*. 2025. № 504. Article 111092. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2025.111092
14. Ritchey T. General morphological analysis: An overview. *Academia Letters*. 2022. Article 4620. DOI: https://doi.org/10.20935/AL4620
15. Vieira M., Macedo A., Alvarenga A., Lafoz M., Villalba I., Blanco M., Rojas R., Romero-Filgueira A., García-Mendoza A., Santos-Herran M., Alves M. What future for marine renewable energy in Portugal and Spain up to 2030? Forecasting plausible scenarios using general morphological analysis and clustering techniques. *Energy Policy*. 2024. № 184. Article 113859. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113859
16. Sedighi E., Salmanmahiny A., Fath B. D., Daliri H. A spatial scenario planning framework for land use decision-making: case study of Gorgan township, Iran. *Environment, Development and Sustainability*. 2025. № 27. P. 25403–25428. DOI: https://doi.org/10.1007/s10668-024-04639-w.

Дата першого надходження статті до видання: 30.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 612.014.41
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.38

ВПЛИВ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ ФЛУКТУАЦІЙ АТМОСФЕРНОГО ТИСКУ НА ВЕГЕТАТИВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЮДИНИ

Горго Ю.П.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Берестейський пр. 37, 03056, м. Київ
yugorgo@ukr.net

Були проведені експерименти по вивченню впливу модельованих слабких (A = 50÷80 Pa) низькочастотних (< 1Hz) коливань атмосферного тиску (НКАТ), що імітували природні флуктуації атмосферного тиску при помірному рівні збурень, на вегетативні показники здорової людини в стані спокою. На групі волонтерів було визначено, що 20-хвилинна експозиція НКАТ супроводжувалась змінами артеріального тиску, температури, тривалості затримки дихання та частоти серцевих скорочень. Проведено кореляційний та статистичний аналіз даних щодо відносних змін вегетативних показників людини при впливах НКАТ. Показано, що достовірне збільшення середньої тривалості кардіоінтервалів під впливом НКАТ, в порівнянні з контролем, супроводжується достовірним посиленням потужності спектра варіабельності серцевого ритму в низькочастотному і високочастотному діапазонах. З'ясовано, що хаотичні та періодичні НКАТ можуть мати стимулюючий чи дезорганізуючий вплив на характер реакцій вегетативних характеристик людини, який залежить від вікових та функціональних особливостей людини, а також особливостей центральної регуляції активності артеріальних барорецепторів. В атмосфері Землі часто виникають флуктуації атмосферного тиску в частотному діапазоні змодельованих НКАТ, але із більшими амплітудами. В сучасних умовах життєдіяльності людини також часто виникають штучні коливання тиску з подібними амплітудно – частотними характеристиками. Виявлені відмінності в реакціях на періодичні та хаотичні НКАТ вказують на можливі негативні фізіологічні реакції людини при дії значних рівнів природних та штучних коливань атмосферного тиску, які здатні впливати на безпеку життєдіяльності людини та можуть мати соціальні наслідки їх дії. Флуктуації атмосферного тиску слід вивчати та контролювати, як екологічно важливий фактор. *Ключові слова:* низькочастотні коливання атмосферного тиску, вегетативні показники, амплітудно-частотні характеристики.

The effect of low-frequency fluctuations in atmospheric pressure on human vegetative characteristics. Gorgo Yu.
Experiments were conducted to study the effect of simulated weak (A = 50–80 Pa) low-frequency (< 1 Hz) atmospheric pressure fluctuations (LAPF), which mimicked natural atmospheric pressure fluctuations at a moderate level of disturbance, on the autonomic parameters of a healthy person at rest. In a group of volunteers, it was determined that a 20-minute exposure to LAPF was accompanied by changes in blood pressure, temperature, breath-holding duration, and heart rate. A correlation and statistical analysis of data regarding relative changes in human vegetative parameters under the influence of LAPF was conducted. It was shown that a significant increase in the average duration of cardiac intervals under the influence of LAPF, compared to the control group, is accompanied by a significant increase in the power of the heart rate variability spectrum in the low-frequency and high-frequency ranges. It was found that chaotic and periodic LAPFs can have a stimulating or disorganizing effect on the nature of human autonomic responses, which depends on the individual's age and functional characteristics, as well as on the characteristics of central regulation of arterial baroreceptor activity. In the Earth's atmosphere, fluctuations in atmospheric pressure frequently occur within the frequency range of the simulated LAPFs, but with larger amplitudes. In modern living conditions, artificial pressure fluctuations with similar amplitude-frequency characteristics also frequently occur. The identified differences in reactions to periodic and chaotic atmospheric pressure fluctuations indicate possible negative physiological reactions in humans when exposed to significant levels of natural and artificial atmospheric pressure fluctuations, which can affect human safety and may have social consequences. Atmospheric pressure fluctuations should be studied and monitored as an ecologically important factor. *Key words:* low-frequency atmospheric pressure fluctuations, vegetative indicators, amplitude-frequency characteristics.

Постановка проблеми. Людське суспільство знає, що існують несприятливі дні, коли кількість захворювань, аварій, нещасних випадків, проявів агресивності значно підвищується. Часто це пов'язують із змінами погоди, метеорологічних факторів чи геомагнітних збурень [1]. Одна із гіпотез пояснює це можливим космічним впливом на параметри атмосферного тиску повітря [2]. Показано, що вплив сонячної активності на живі істоти може передаватися через інфразвуковий шум, що створюється в атмосфері Землі природним шляхом чи через діяльність людини в діапазоні дуже низьких частот, біля 0.01-1 Гц [3]. Відомо, що існують різні типи низькочастотних флуктуацій атмосферного тиску

© Горго Ю.П., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

(ФАТ). Безладні (хаотичні) ФАТ існують в діапазоні частот нижче 1 Гц, і є природним шумом атмосфери, що виникає при багатьох природних явищах: проходженні атмосферних фронтів, штормах, ураганах, землетрусах тощо [4]. Амплітуди природних ФАТ залежать від потужності атмосферних збурень і їх помірні значення в середніх широтах можуть досягати 50-100 Па [5]. Існує ще турбулентний шум атмосферних течій з дуже широким спектром низьких частот та внутрішні гравітаційні хвилі, з частотами нижче 0.01 Гц [6].

При діяльності людини також виникають інфразвуки, що створюють технічні пристрої в діапазоні 0,5-5 Гц, які відомі своїми значним впливом на психофізіологічні системи [7]. Повідомлялось про значний негативний вплив штучних коливань тиску повітря з періодом близько 4 с та амплітудою від 50 до 500 Па на деякі види працездатності людини [8]. Ми відносимо такі коливання тиску до штучних ФАТ [9].

Тому *актуальним завданням* була перевірка гіпотези, чи може вплив низькочастотних природних та штучних ФАТ викликати помітні зміни у вегетативних та психофізіологічних характеристиках людини. Було виконано дослідження з *метою* перевірки здатності модельованих штучних коливань тиску повітря на частотах < 1Hz викликати суттєві зміни вегетативних параметрів здорової людини в стані спокою.

Методика досліджень. Група здорових волонтерів піддавалася дії змодельованих слабких низькочастотних коливань атмосферного тиску (НКАТ), з параметрами природних ФАТ в низькочастотному діапазоні, типовими для помірного рівня атмосферних збурень. Індикаторами реакцій організму людини на такі впливи були обрані такі вегетативні показники, як частота пульсу, тривалість затримки дихання, артеріальний тиск крові та температура тіла. Також було оцінено впливи змодельованих НКАТ на спектральну динаміку варіабельності кардіоінтервалів у високочастотному (дихальному) і низькочастотному (судинному) діапазонах [10].

Змодельовані НКАТ створювали за допомогою генератора низьких частот. Період і амплітуда таких НКАТ регулювалась відповідно у діапазоні 1÷100 с та 20 ÷ 100 Па. Амплітуду НКАТ контролювали за допомогою приладу "Атмосфера-Р1", що вимірював амплітуду на частотах < 1Hz і виробляв запис у власну пам'ять з виходом на комп'ютера. В експериментах застосовувалися наступні види НКАТ:

1) близькі до синусоїди слабкі періодичні сигнали з періодами коливань Т = 15, 30, 45 або 90 с з амплітудами А = 50-80 Па та Т = 6 с (А = 30 Па);

2) квазіхаотичний сигнал, що імітував хаотичні ФАТ з амплітудою 50 Па.

В експериментах найчастіше період НКАТ складав 45 с, а амплітуда 50 Па.

Для вимірювань частоти пульсу, артеріального тиску та температури тіла був застосований автоматизований вимірювач фізіологічних характеристик КТД-8 фірми "Медімпекс". Періоди кардіоінтервалів вимірювались ритмокардіоскопом РКС-01. Для візуалізації кардіосигналу використовували електрокардіоскоп ЕКС 2-01.

У експериментах приймали участь 45 практично здорових волонтерів віком від 20 до 60 років. Кожен з них брав участь, в більшості, у 8 модельних і 8 контрольних експериментах. Всього було проведене 253 експериментів. Дослідження проводили індивідуально з кожним учасником, в ізольованому для зовнішнього тиску приміщенні, один раз на день у призначений для цього час. Експерименти проводили у положенні сидячи. Частоту серцевого ритму реєстрували за першим стандартним відведенням.

Порядок чергування модельних і контрольних експериментів був випадковим. Учасникам експерименту не повідомляли, коли застосовували НКАТ в поточному експерименті. В контрольному і модельному експериментах учасники виконували слабке розумове навантаження (комп'ютерна гра Тетріс) та тест на затримку дихання. Всі вони були поінформовані про характер експериментів та сигнал, що застосовувався. В експериментах застосовували періодичні та хаотичні слабкі низькочастотні коливання атмосферного тиску, які імітували природні ФАТ. Експозиція НКАТ тривала 20 хвилин при 30-хвилинному часі експерименту.

Вимірювали 2 варіанти частоти серцевих скорочень: звичайну, усереднену за 1 хв, та текучу величину, що визначалася по 5 ударах пульсу. Останній варіант був корисний для оцінки варіабельності пульсу. Температуру тіла вимірювали за допомогою терморезистивного сенсора з відповідною похибкою $\pm$ 0.05°С. Термосенсор закріплювали на шиї учасника. За даними кожного двохвилинного запису кардіоінтервалів обчислювали середню тривалість кардіоінтервалів (Т-rr), а також такі спектральні показники ритму серця, як щільність потужностей високочастотної (ВЧ) (0.15-0.4Гц) і низькочастотної (НЧ) (0.04 – 0.15 Гц) компоненти спектру варіабельності кардіоінтервалів та співвідношення (НЧ/ВЧ) [11].

В отриманих даних аналізували відносні зміни вегетативних показників, як різницю між значеннями показника, отриманими в першому і повторному вимірюванні, віднесену до їхньої середньої величини. Індивідуальні значення частоти пульсу та артеріального тиску перед усередненням по групі ділили на відповідні індивідуальні середні величини для їх переводу у відносні одиниці.

Спектральний аналіз проводили за допомогою швидких перетворень Фур'є. Набори даних кардіоінтервалів перевіряли візуально та усували всі артефакти. Більшість наборів даних з абсолютними значеннями показників відхилялися від нормального розподілу. Однак відносні зміни показників (Смірнова-Колмогорова) вірогідних

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

відзнак від нормального розподілу не виявили. Вірогідність відмінностей між двома наборами даних оцінювали за t-критерієм Стьюдента. Для оцінки залежності відносних змін показників від вихідного рівня одного з показників застосовували дисперсійний аналіз. Вихідне значення показника відносили до підвищеного рівня, якщо його величина перевищувала середнє індивідуальне значення, і до пониженого, у протилежному випадку. Досліджували також характер взаємозв'язку між відносними змінами показників за допомогою кореляційного аналізу. Статистичну обробку даних проводили за допомогою пакетів Statistica-6 і Microsoft Excel.

Отримані результати. Ми спостерігали індивідуальну реакцію зміни частоти пульсу від початкових значень на включення та виключення хаотичних НКАТ з А=50 Па. Пульс вірогідно підвищувався при включенні НКАТ та повертався до попереднього значення після виключення генератора (рис. 1).

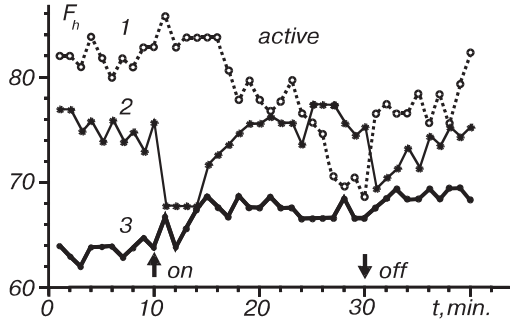


Рис. 1. Зміни в часі індивідуальної частоти пульсу у 1-му, 2-му та 3-му експериментах. Моменти включення та виключення генератора НКАТ указані стрілками. F_h – значення частоти пульсу (уд /хв)

Також відмічено, що включення НКАТ викликала збільшення варіабельності частоти пульсу, яка залишалася підвищеною протягом всього часу дослідження (рис. 2).

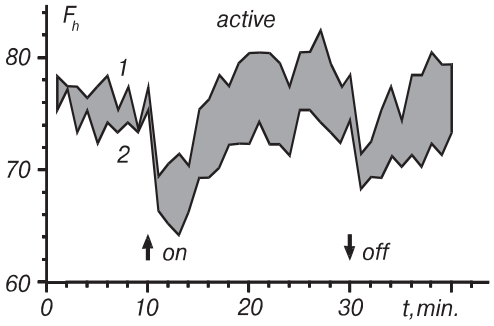


Рис. 2. Зміни в часі біжучих значень максимальної (1) та мінімальної (2) частоти пульсу в одному і тому ж експерименті. Виміри по 5 значеннях пульсу

F_h – значення частоти пульсу (уд /хв).

Слід також відмітити, що усереднена по групі відносна зміна (F_h%) частота пульсу за весь час дії змодельованих (activ) НКАТ була достовірно та стабільно вищою за період, коли генератор був виключений. В контролі (control) для цієї ж групи такої стабільності підвищення частоти пульсу не відмічено (рис. 3).

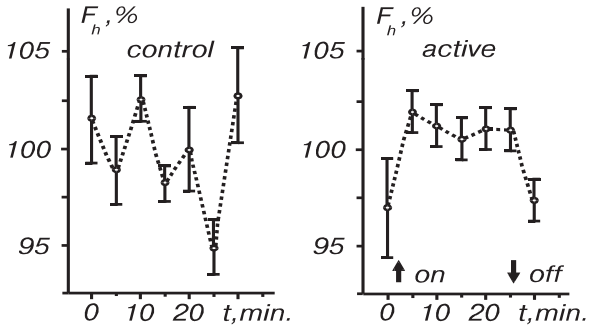


Рис. 3. Усереднені по групі відносні зміни (F_h%) частоти пульсу

Вертикальні відхилення показують величину стандартної похибки кожного середнього значення виміру. 100-процентний рівень F_h% показника відповідає його середньому значенню під час експерименту.

Зміни артеріального тиску під дією НКАТ, в середньому по групі, відрізнялася від контролю. В контрольних дослідах як систолічний тиск P_{sys} (рис.4), так і діастолічний тиск P_{dia} (рис.5) мали явну тенденцію до зниження. Можливо, це відбувалось внаслідок зниження тонусу сосудів системи кровообігу в процесі експерименту, як результат нерухомості, монотонії та відсутності будь-якої роботи.

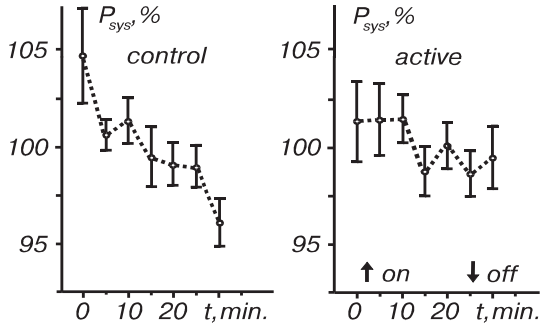


Рис. 4. Усереднені по групі зміни артеріального тиску в контролі та при моделюванню НКАТ

В той же час під дією НКАТ тенденція систолічного артеріального тиску до падіння зникала (рис.4), що вказує на стимулюючу дію НКАТ на тиск крові. Однак, всі індивідуальні реакції тиску крові у обстежуваних на дію НКАТ виявилися складними і потребують більш детального вивчення.

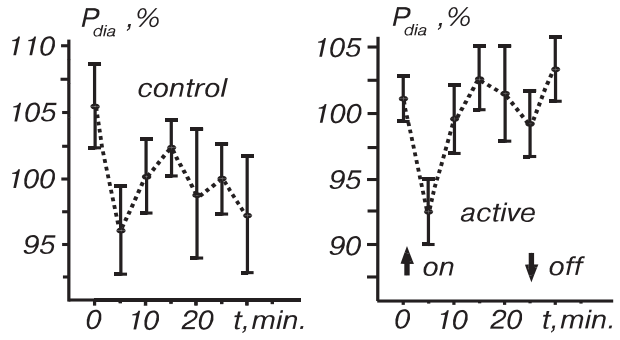


Рис. 5. Усереднені по групі зміни діастолічного артеріального тиску в контролі та при моделюванні НКАТ

Усереднена по групі температура тіла в контрольних дослідах показала виражену тенденцію до росту (рис.6). Це могло бути проявом адаптації організму до знаходження в пасивному, розслабленому стані, де будь-які емоційні впливи були виключені. В період роботи генератора НКАТ зміни температури тіла відбувалися, але не достовірно (рис.6). Різниця у поведінці змін температури під дією НКАТ та в контролі вказує на стимулюючу дію цього фактору на температуру.

Періодичні та хаотичні змодельовані коливання атмосферного тиску (НКАТ) у багатьох випадках по різному впливали на вимірювані вегетативні показники. Найбільш явний ефект такого впливу на відносні зміни (F_h%) усередненої по групі частоти

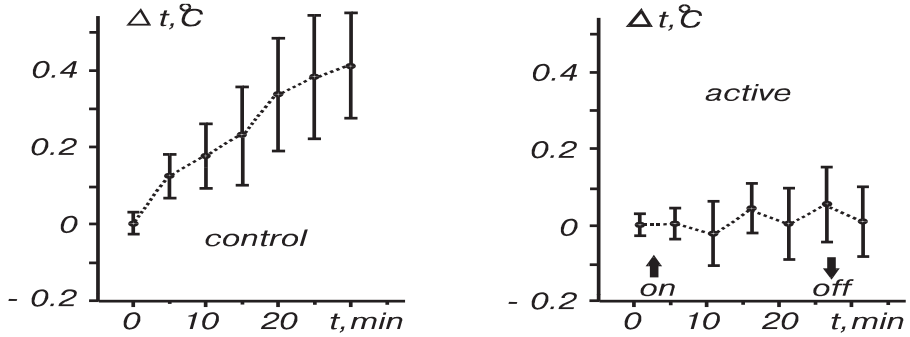


Рис. 6. Усереднені по групі зміни температури тіла в контролі та при моделюванні НКАТ

пульсу мав місце при дії періодичних НКАТ з Т = 30, 45 та 90 с (рис. 7). При дії періодичних НКАТ на цих частотах спостерігались вірогідне уповільнення пульсу. Але видно, що при дії хаотичних НКАТ відбувається значне підвищення частоти серцевих скорочень (рис. 7).

Крім того, як з'ясувалось, при дії періодичних НКАТ з періодом Т = 30 відбувалось найбільше збільшення тривалості затримки дихання (рис.8). Різниця у результатах змін тривалості затримки дихання під дією НКАТ та в контролі додатково вказує на стимулюючу дію цього фактору.

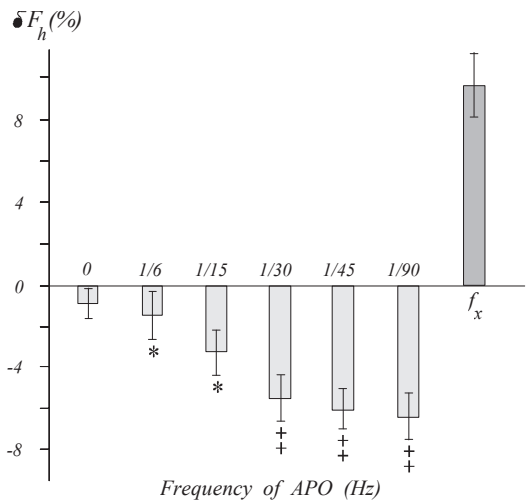


Рис. 7. Відносні зміни частоти пульсу в дослідах за дією періодичних та хаотичних (затемнені) НКАТ

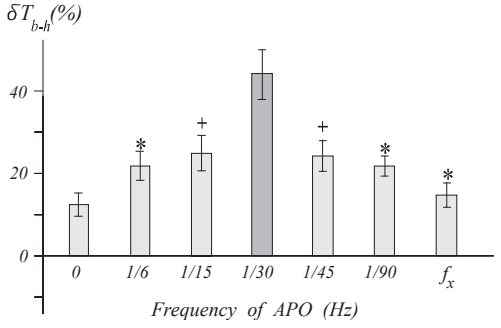


Рис. 8. Відносні зміни тривалості затримки дихання при дії періодичних та хаотичних (f_x) НКАТ. Затемнений стовпчик показує період НКАТ, при дії яких спостерігаються найбільші зміни тривалості затримки дихання

Були проведені обчислення записів спектральних показників ритму серця в двох вікових групах волон-

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

терів (20-40 та 41-60 років).Визначались середня тривалості кардіоінтервалів (T-RR), щільність потужностей високочастотної (HF) (0.15-0.4Гц) та низькочастотної компоненти (LF) (0.04 – 0.15 Гц), а також співвідношення (LF/HF) спектру варіабельності кардіоінтервалів при дії періодичних (T = 1/45) НКАТ (рис.9).

Достовірне збільшення середньої тривалості кардіоінтервалів (T – RR) під впливом НКАТ (АРМО), в порівнянні з контролем, супроводжується достовірним посиленням потужності спектра варіабельності серцевого ритму в низькочастотному (LF) і високочастотному (HF) діапазонах (рис.9). Відомо, що високочастотні варіації ритму серця генеруються

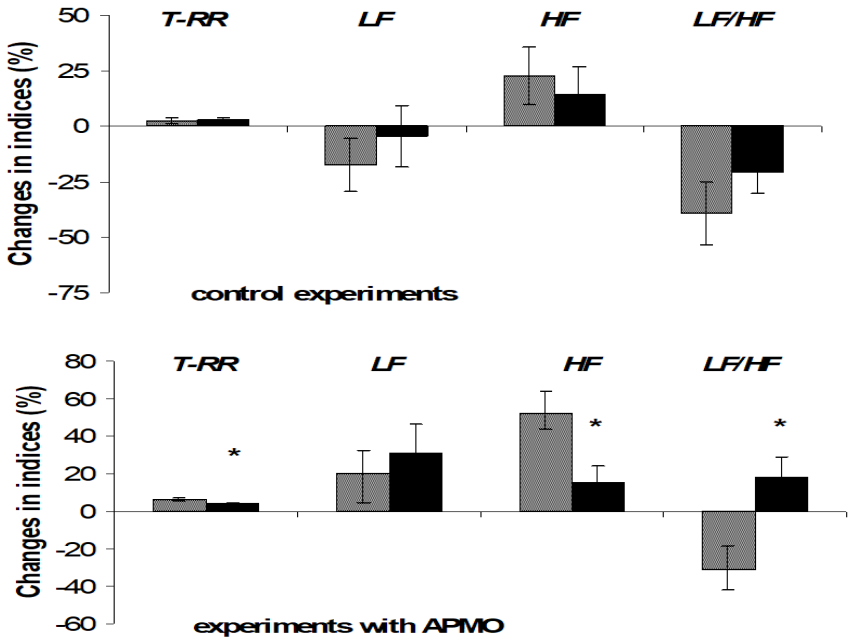


*Рис. 9. Зміни параметрів серцевого ритму в контролі (вгорі) та при моделюванні впливу НКАТ (АРМО) (внизу). Сірі стовпчики – у молодшій віковій групі; чорні стовпчики – у старшій віковій групі. T-RR – середня тривалість кардіоінтервалів. LF – низькочастотна компонента спектра; HF – високочастотна компонента спектра; LF/HF – відношення низькочастотної до високочастотної компоненти спектра, варіабельності кардіоінтервалів. * – достовірність відмінностей даних між молодшою та старшою віковими групами з $p < 0,05$*

дихальною модуляцією парасимпатичної активності [11], а показник HF розглядають як її маркер. Низькочастотні варіації LF сприймають, як механізм симпатико – барорецепторної ауторегуляції вазомоторного тонусу судин. LF також вважають комплексним показником, що включає симпатичну і парасимпатичну компоненти [12]. Тому співвідношення LF/HF часто може бути маркером симпатичної активності [13].

Із отриманих результатів видно, що збільшення тривалості кардіоінтервалів і варіабельності серцевого ритму найімовірніше пов'язане із парасимпатичним барорефлекторним вкладом в реакцію серцевого ритму в порівнянні із центральним. Зменшення центрального вкладу в реакцію ритму серця на дію НКАТ було достовірно більшим в старшій віковій групі (рис.9). В молодшій віковій групі вплив НКАТ супроводжувався достовірним збільшенням тривалості кардіоінтервалів (T-RR) і їх варіабельності у високочастотному діапазоні (рис. 9). Такий вплив періодичних НКАТ на старшу вікову групу може бути пов'язаний із погіршенням з віком функціональних можливостей механізмів центральної регуляції активності артеріальних барорецепторів.

В середньому по всій групі, при впливах періодичних НКАТ, показник HF вірогідно збільшувався (56,87%, $p<0,05$) та вірогідно зростала тривалість кардіоінтервалів (T-rr) (4,54%, $p<0,05$), відносно контролю. Між змінами показників HF і T-rr спостерігалась найбільша позитивна кореляція ($r=0.75$, $p < 0.001$). В той же час, в середньому по групі варіабельність кардіоінтервалів у діапазоні низькочастотної модуляції LF збільшилась (47,56%, $p<0,05$) відносно контролю, але вірогідно не змінилася відносно T-rr (рис. 9).

Варто відмітити суб'єктивні відчуття волонтерів в експериментах. Частина з них відмічали покращену працездатність, підвищений емоційний тонус

та відсутність втоми після дії модельованих *періодичних* НКАТ до самого вечора. Деякі повідомляли про появу почуттів розслаблення та сонливості при включенні НКАТ. Ці симптоми виникали переважно у людей із втомою або у волонтерів, що прийшли на експеримент після прийому їжи. В протилежність до *періодичних*, *хаотичні* НКАТ негативно впливали на ряд вегетативних характеристик людини. Найбільш виражені негативні реакції на дію хаотичних НКАТ спостерігались у людей, які почували себе не дуже добре. У них після впливу хаотичних НКАТ відмічали роздратованість, підвищену збудливість, які супроводжувалися суттєвими змінами частоти серцевих скорочень, кров'яного тиску, тривалості затримки дихання та температури тіла. Ми вважаємо, що хаотичні та періодичні НКАТ можуть мати стимулюючий чи дезорганізуючий вплив на вегетативні характеристики людини, а характер відгуку організму на вплив НКАТ залежить від вікових та функціональних особливостей і адаптаційних можливостей людини.

Обговорення результатів. В експериментах спостерігалось, як 20-хвилинна експозиція періодичних та хаотичних НКАТ, що імітували помірні флуктуації атмосферного тиску Землі, викликала достовірні різно направлені зміни вегетативних характеристик людини, особливо серцевого ритму. На рис.1–рис.6 видно, що при дії слабких низькочастотних змінах атмосферного тиску достатньо швидко виникають відгуки фізіологічних систем організму. Результати досліджень показують, що характер і величина змін вегетативних параметрів здорової людини під впливом НКАТ, пов'язані з інтенсивністю і впорядкованістю ритмічної організації флуктуацій тиску, а також із віковими та функціональними особливостями організму і центральної регуляції активності артеріальних барорецепторів.

В атмосфері Землі часто виникають ФАТ з амплітудами і в частотному діапазоні змодельованих НКАТ. Крім того, в сучасних умовах життєдіяльності людини також виникають штучні акустичні коливання з подібними амплітудно – частотними характеристиками. Наприклад, в закритих апаратах та приміщеннях їх можуть створювати системи із кондиціонуванням повітря чи використанням вентилятора. Зміна висоти на 1 м приводить до зміни атмосферного тиску приблизно на 13 Па. Тому, рухаючись в ліфті або пересікаючи горбисту місцевість в автомобілі, ми створюємо штучні НКАТ навколо себе. Збурення тиску повітря неминуче виникають в літаках. НКАТ також генерують тунелі внаслідок руху поїздів чи авто.

Нескладні оцінки показують, що амплітуда ФАТ природного та штучного походження, що виникають у довкіллі, може досягати значущих величин у десятки або сотні Паскалів, що може впливати на суттєві зміни фізіологічних характеристик людини. Рівень амплітуди та частоти природних та штучних ФАТ дуже мінливий, а людина не має виражених зовнішніх рецепторів для відчуття цього фактору, крім артеріальних барорецепторів. Виявлений вплив модельованих НКАТ на вегетативні параметри людини, роблять штучні та природні ФАТ важливим *екологічним* фактором, який може мати виражений вплив на безпеку на дорогах, в побуті або на робочому місці, особливо якщо враховувати тривалість його дії [14].

Виявлення зв'язків між впливом ФАТ з різними характеристиками на фізіологічні системи не є простим, оскільки ФАТ це складний фактор з широким амплітудно – частотним спектром, а характер впливу залежить від індивідуальних особливостей функціональних станів організму людини. Наші експерименти показали, що дія періодичних НКАТ може мати стимулюючий вплив на вегетативні характеристики, що може бути корисним для нормалізації стану та діяльності людини. А коливання тиску повітря з неоптимальною інтенсивністю та хаотичним частотним складом можуть негативно впливати на працездатність людини та її самопочуття. Ослаблені або хворі люди можуть відчувати появу виражених негативних наслідків при їх впливах.

Висновки.

1. Змодельовані низькочастотні коливання атмосферного тиску в амплітудно-частотному діапазоні помірних природних рівнів впливають на зміни артеріального тиску, температури, тривалості затримки дихання, а особливо на показники варіабельності серцевого ритму.

2. Хаотичні та періодичні НКАТ можуть мати стимулюючий чи дезорганізуючий вплив на вегетативні характеристики людини, характер реакцій організму на такі впливи залежить від вікових та функціональних особливостей людини, а також особливостей центральної регуляції активності артеріальних барорецепторів.

3. Виявлені відмінності в реакціях на періодичні та хаотичні НКАТ вказують на можливі негативні фізіологічні реакції людини при дії значних рівнів природних коливань атмосферного тиску, які здатні впливати на безпеку життєдіяльності людини та можуть мати соціальні наслідки їх дії. Флуктуації атмосферного тиску слід контролювати, як екологічно важливий фактор.

Література

1. Richner H., Graber W. The ability of non – classical meteorological parameters to penetrate into buildings. *Int. J. Biometeorology.* 1978, 22 (2). P.242-248.
2. Ertel S. Bursts of creativity and aberrant sunspot cycles: hypothetical covariations. *In: Nyborg H. (Ed.) The Scientific Study of Human Nature. Tribute to Hans J. Eysenck at Eighty.* 1997, New York: Elsevier, P. 491-510.

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

3. Delyukov A. Infradian rhythms of extralow-frequency perturbations of atmospheric pressure: preliminary results. *In: Chronobiology and Its Roots in the Cosmos. Proceedings of the 3rd International Workshop. The High Tatras, Slovakia,* Sept 1997, P.201-208.
4. Нікберг І.І., Ревуцький Є.Л., Сакалі Л.І. Геліометеотропні реакції людини. Київ: Здоров'я, 1986, 144 с.
5. Bull G., Goering H., Neisser Z. Infrasonic waves in the atmosphere. *J. Meteorology*. 1988. №38. P. 265-283
6. Bedard A.J., Georges T.M. Atmospheric infrasound. *Physics today.*2000, №3. P. 32- 37.
7. Делюков А.О., Горго Ю.П. Про біологічну активність флуктуацій атмосферного тиску та їх роль у навколишньому середовищі. *Природничі науки.* Київ: Видавничий центр " Київський університет ", 1999. С. 181-188.
8. Gorgo Yu.P., Dirckx J.J., Didyk L.A., Miroshnik T.G., Bogdanov V.B. Physiological effects of slight fluctuations of atmospheric pressure. *Deutscher Wetterdienst. Anallen der Meteorilogie.* 2005. Vol.1, N 41. P. 368-371. ISSN 4122, ISBN 3-88148-405-1
9. Delyukov A., Gorgo Yu., Didyk L. Changes in physiological characteristics in humans caused by low-frequency atmospheric pressure perturbations. *In: Proceedings of the 14th International Congress of Biometeorology*. Ljubljana, Slovenia. Sept 1996. Part 2, vol.2, P.312-320.
10. Malliani A., Pagani M., Lombardi F., Cerutti S. Cardiovascular neural regulation explored in the frequency domain. *Circulation* 1991. Vol. 84, N2. P. 482-489.
11. Hojgaard M.V., Holstein–Rathlon N–H., Agner E., Kanters J.K. Dynamics of spectral components of heart rate variability during changes in autonomic balance. *Am. J. of Physiology*.1998. Vol. 275. P. 213–219.
12. Yoshikawa N., Baba A., Akaishi M. et al. Neurohumoral activations in congestive heart failure: correlations with cardiac function, heart rate variability, and baroreceptor sensitivity. *Am. Heart J.* 1999, Vol. 173, N 4, Pt 1, P. 666-671.
13. Bernardi L., Leuzzi S., Radaelli A. Low-frequency spontaneous fluctuations of R-R interval and blood pressure in conscious humans: a baroreceptor or central phenomenon? *Clinical Sci. (Colch)*. 1994, v. 87, p. 649-654.
14. Didyk L.A., Gorgo Yu.P., Dirckx J.J.J., Bogdanov V. et al. Atmospheric pressure fluctuations in the far infrasound range and emergency transport events coded as circulatory system diseases. *Int. J. of Biometeorology.* 2008. N 52. P.553-561. DOI: 10.1007/s00484-008-0163-6

Дата першого надходження статті до видання: 30.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 504.06:711.4:502.4
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.39

ПРИРОДООХОРОННІ ТЕРИТОРІЇ ТА ЕЛЕМЕНТИ ОХОРОНЮВАНИХ ЛАНДШАФТІВ У СИСТЕМІ ПІДГОТОВКИ ТА РЕАЛІЗАЦІЇ ПІДХОДІВ СТРАТЕГІЧНОЇ ЕКОЛОГІЧНОЇ ОЦІНКИ ДОКУМЕНТІВ ПЛАНУВАННЯ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАД

Карпенко Ю.О., Свердлов В.О.
Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка
вул. Гетьмана Полуботка, 53, 14013, м. Чернігів
yuch2011@i.ua, vovasv8989@ukr.net

У роботі досліджено теоретико-методичні та прикладні аспекти врахування природоохоронних територій і елементів охоронюваних ландшафтів у процесі підготовки та реалізації стратегічної екологічної оцінки (СЕО) документів планування територіальних громад. Проаналізовано функціональну роль об'єктів природно-заповідного фонду у формуванні екологічного каркасу територій та забезпеченні екологічної безпеки на локальному рівні. Обґрунтовано значення ландшафтного підходу як інструменту інтеграції екологічних чинників у просторове планування та управління територіальним розвитком.

Визначено місце природоохоронних територій у структурі процедур СЕО, зокрема на етапах визначення обсягу оцінки, підготовки звіту, аналізу альтернатив та прийняття управлінських рішень. Розкрито особливості врахування як формалізованих (об'єкти природо-заповідного фонду (ПЗФ), так і неформалізованих елементів охоронюваних ландшафтів, включаючи водоохоронні зони, прибережні захисні смуги, водно-болотні угіддя, зелені насадження, природні біотичні комплекси. Акцентовано увагу на необхідності комплексного використання геоінформаційних систем і просторового аналізу для ідентифікації екологічно чутливих територій.

Запропоновано підхід до оцінювання екологічної чутливості територій на основі інтегральних показників, що враховують площу, ступінь фрагментації, рівень антропогенного навантаження та екосистемну цінність природних комплексів. Доведено, що інтеграція даних про природоохоронні території у процедури СЕО сприяє підвищенню якості планувальних рішень, мінімізації негативного впливу на довкілля та забезпеченню збалансованого розвитку територіальних громад.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання при розробці містобудівної документації, стратегій розвитку територіальних громад та вдосконаленні процедур СЕО в Україні. *Ключові слова:* стратегічна екологічна оцінка, територіальні громади, природно-заповідний фонд, охоронювані ландшафти, інтегральний показник екологічної чутливості, ландшафтне планування, сталий розвиток, геоінформаційні системи.

Nature conservation areas and elements of protected landscapes in the system of preparation and implementation of approaches to strategic environmental assessment of planning documents of territorial communities. Karpenko Yu., Sverdlov V.

The paper explores theoretical, methodological and applied aspects of taking into account protected areas and elements of protected landscapes in the process of preparing and implementing strategic environmental assessment (SEA) of planning documents of territorial communities. The functional role of nature reserve fund objects in forming the ecological framework of territories and ensuring environmental safety at the local level is analyzed. The importance of the landscape approach as a tool for integrating environmental factors into spatial planning and territorial development management is substantiated. The place of protected areas in the structure of SEA procedures is determined, in particular at the stages of determining the scope of the assessment, preparing the report, analyzing alternatives and making management decisions. The features of taking into account both formalized (objects of the nature reserve fund (NRF)) and informal elements of protected landscapes, including water protection zones, coastal protection strips, wetlands, green spaces, natural biotic complexes, are revealed. Attention is focused on the need for comprehensive use of geographic information systems and spatial analysis to identify environmentally sensitive areas.

An approach to assessing the environmental sensitivity of territories based on integral indicators that take into account the area, degree of fragmentation, level of anthropogenic load and ecosystem value of natural complexes is proposed. It is proven that the integration of data on nature reserves into SEA procedures contributes to improving the quality of planning decisions, minimizing negative impact on the environment and ensuring balanced development of territorial communities.

The practical significance of the results obtained lies in the possibility of their use in the development of urban planning documentation, strategies for the development of territorial communities and improving SEA procedures in Ukraine. *Key words:* strategic environmental assessment, territorial communities, nature reserve fund, protected landscapes, integrated indicator of ecological sensitivity, landscape planning, sustainable development, geographic information systems.

Постановка проблеми. Сучасний етап розвитку територіального управління в Україні характеризується активізацією процесів децентралізації, що супроводжується передачею значних повноважень у сфері просторового планування та природокористування на рівень територіальних громад. За таких

© Карпенко Ю.О., Свердлов В.О., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

умов суттєво зростає відповідальність органів місцевого самоврядування за екологічну збалансованість прийнятих рішень, особливо в контексті довгострокового планування розвитку територій. Водночас посилення антропогенного навантаження, інтенсифікація використання природних ресурсів, урбанізаційні процеси та зміни клімату призводять до деградації природних екосистем, втрати біорізноманіття та порушення ландшафтної структури територій.

У цьому контексті стратегічна екологічна оцінка (СЕО) виступає одним із ключових інструментів інтеграції екологічних аспектів у процеси розроблення документів державного планування, зокрема стратегій розвитку територіальних громад, генеральних планів населених пунктів та комплексних планів просторового розвитку територій. Проте, незважаючи на нормативно-правове закріплення процедури СЕО, її практична реалізація часто носить формальний характер, що знижує ефективність врахування екологічних обмежень та ризиків.

Особливої актуальності набуває проблема недостатнього врахування природозаповідних територій та елементів охоронюваних ландшафтів у процесах СЕО. Об'єкти ПЗФ, які повинні виступати базовими елементами екологічної мережі, нерідко розглядаються ізольовано від загальної структури просторового планування або враховуються частково чи декларативно. Ще більш складною є ситуація з елементами охоронюваних ландшафтів, що не мають чітко визначеного правового статусу, але виконують важливі екосистемні функції – такими як водоохоронні території, природні зелені коридори, лучні та болотні комплекси, прибережні захисні смуги тощо.

Актуальність дослідження. Відсутність системного підходу до ідентифікації, оцінювання та інтеграції таких територій у процедури СЕО призводить до фрагментарності екологічного аналізу, недооцінки кумулятивних ефектів господарської діяльності та прийняття рішень, які можуть мати довгострокові негативні наслідки для довкілля. Крім того, обмежене використання сучасних інструментів просторового аналізу, зокрема геоінформаційних систем, ускладнює процес формування повної та достовірної екологічної бази даних для проведення СЕО.

Таким чином, виникає науково-практична проблема необхідності вдосконалення підходів до врахування природоохоронних територій та елементів охоронюваних ландшафтів у системі стратегічної екологічної оцінки документів планування територіальних громад. Це потребує розробки комплексних методичних рішень, спрямованих на інтеграцію ландшафтного та екосистемного підходів у процедури СЕО, підвищення рівня їх аналітичної обґрунтованості та забезпечення реального впливу екологічних факторів на процес прийняття управлінських рішень.

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

Авторський доробок у межах дослідження спрямований на вирішення актуальних наукових і прикладних завдань у сфері екологічно збалансованого просторового розвитку територіальних громад в умовах децентралізації та реформування системи управління природокористуванням в Україні. Зокрема, результати дослідження безпосередньо пов'язані з реалізацією державної політики у сфері охорони довкілля, збереження біорізноманіття, формування національної екологічної мережі та впровадження механізмів стратегічної екологічної оцінки у процеси планування територій.

Наукова складова роботи полягає у розвитку методичних підходів до інтеграції природоохоронних територій та елементів охоронюваних ландшафтів у процедури СЕО документів державного планування, що відповідає сучасним концепціям ландшафтного та екосистемного підходів. Запропоновані підходи сприяють удосконаленню теоретичних засад екологічної оцінки, зокрема в частині врахування просторової структури територій, кумулятивних ефектів впливу та взаємозв'язків між природними компонентами [2].

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх застосування органами місцевого самоврядування, розробниками містобудівної документації, а також фахівцями у сфері екологічного планування при підготовці звітів про СЕО, стратегій розвитку територіальних громад, комплексних планів просторового розвитку територій та інших документів планування. Використання запропонованих підходів дозволить підвищити якість екологічного аналізу, забезпечити більш повне врахування природоохоронних обмежень, а також мінімізувати ризики прийняття управлінських рішень, що можуть мати негативні наслідки для довкілля.

Крім того, результати дослідження можуть бути використані у процесі вдосконалення нормативно-методичного забезпечення проведення СЕО, а також при розробці навчальних програм і підготовці фахівців у галузі екології, географії та просторового планування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика інтеграції екологічних чинників у процеси територіального планування та розвитку громад є предметом активних досліджень у вітчизняній і зарубіжній науці. Значна увага приділяється стратегічній екологічній оцінці (СЕО) як інструменту забезпечення сталого розвитку та врахування екологічних обмежень у документах державного планування.

У працях українських науковців розкрито теоретичні засади СЕО та її роль у системі просторового планування, зокрема в умовах децентралізації. Дослідники наголошують на необхідності інтеграції екологічних вимог у стратегії розвитку територіаль-

них громад і містобудівну документацію, а також підкреслюють значення СЕО як механізму запобігання негативним екологічним наслідкам [3, 1].

Окремі дослідження присвячені методичним аспектам проведення СЕО, включаючи формування інформаційної бази, оцінювання стану довкілля та прогнозування впливів. Наголошується на доцільності застосування геоінформаційних систем і просторового аналізу для підвищення обґрунтованості екологічних рішень. Водночас у наукових роботах розглядається ландшафтний підхід як основа екологічно орієнтованого планування територій.

Разом із тим аналіз публікацій свідчить, що питання комплексного врахування природоохоронних територій та елементів охоронюваних ландшафтів у процедурах СЕО розроблені недостатньо. У більшості випадків вони розглядаються фрагментарно або без урахування їх ролі в екологічній мережі та формуванні просторової структури територій [5].

Таким чином, існує потреба у подальших дослідженнях, спрямованих на вдосконалення методичних підходів до інтеграції природоохоронних територій та елементів охоронюваних ландшафтів у систему стратегічної екологічної оцінки документів планування територіальних громад.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Незважаючи на значну кількість наукових досліджень, присвячених питанням СЕО та екологізації просторового планування, низка важливих аспектів залишається недостатньо розробленою. Зокрема, відсутній цілісний науково-методичний підхід до системної інтеграції природоохоронних територій та елементів охоронюваних ландшафтів у процедури СЕО документів планування територіальних громад [7].

Недостатньо дослідженими залишаються питання ідентифікації та класифікації елементів охоронюваних ландшафтів, які не мають чітко визначеного правового статусу, але виконують важливі екосистемні функції. Відсутність уніфікованих підходів до їх врахування у процесах екологічної оцінки призводить до фрагментарності аналізу та недооцінки їх значення для забезпечення екологічної стійкості територій.

Потребує подальшого наукового обґрунтування питання врахування просторових взаємозв'язків між об'єктами природно-заповідного фонду та іншими елементами екологічної мережі, зокрема у контексті оцінювання кумулятивних та довгострокових впливів планованої діяльності. Недостатньо опрацьованими є також підходи до інтеграції ландшафтного та екосистемного підходів у процедури СЕО [4].

Окремою проблемою залишається обмежене використання сучасних інструментів просторового аналізу, зокрема геоінформаційних систем, що ускладнює формування повної, достовірної та актуальної інформаційної бази для проведення СЕО. Водночас практична реалізація СЕО часто має формальний характер, що знижує її ефективність як інструменту екологічного управління.

Новизна. Наукова новизна дослідження полягає у розвитку теоретико-методичних підходів до врахування природоохоронних територій та елементів охоронюваних ландшафтів у системі СЕО документів планування територіальних громад.

Уперше запропоновано комплексний підхід до інтеграції об'єктів природно-заповідного фонду та елементів охоронюваних ландшафтів, у тому числі тих, що не мають чітко визначеного правового статусу, у процедури СЕО на основі поєднання ландшафтного та екосистемного підходів [2].

Удосконалено методичні підходи до ідентифікації, класифікації та оцінювання елементів охоронюваних ландшафтів у процесі стратегічної екологічної оцінки, з урахуванням їх просторової структури, функціонального значення та ролі у формуванні екологічної мережі територій.

Дістали подальшого розвитку підходи до застосування геоінформаційних систем у процедурах СЕО, зокрема в частині аналізу просторових взаємозв'язків, оцінювання кумулятивних ефектів та формування екологічно обґрунтованих рішень у документах планування територіальних громад.

Запропоновані наукові положення створюють підґрунтя для підвищення ефективності СЕО як інструменту екологічного управління територіальних громад.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічну основу дослідження становить сукупність загальнонаукових і спеціальних методів, спрямованих на визначення ролі природоохоронних територій та елементів охоронюваних ландшафтів у системі СЕО документів планування територіальних громад. Інформаційною базою слугували нормативно-правові акти України у сфері охорони навколишнього природного середовища та СЕО, матеріали містобудівної документації, зокрема генеральні плани населених пунктів, комплексні плани просторового розвитку територій територіальних громад і стратегії їх розвитку, а також дані державного земельного кадастру, публічної кадастрової карти та відомості про об'єкти природо-заповідного фонду. Додатково використано відкриті геопросторові дані, картографічні матеріали та результати попередніх наукових досліджень.

У процесі дослідження застосовано системний підхід, що дозволив узагальнити теоретичні засади СЕО та визначити функціональне місце природоохоронних територій у структурі просторового планування. Порівняльний аналіз використано для оцінки ступеня врахування цих територій у різних видах планувальної документації, тоді як картографічний метод забезпечив візуалізацію їх просторового розміщення. Геоінформаційний аналіз дав змогу інтегрувати різнорідні просторові дані, здійснити накладання тематичних шарів та виявити зони

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

потенційних екологічних конфліктів, пов'язаних із плановану господарською діяльністю.

Оцінювання екологічної чутливості територій здійснювалося із застосуванням методу інтегральної оцінки, що передбачає врахування сукупності показників, зокрема площі природоохоронних територій, ступеня їх фрагментації, рівня антропогенного навантаження, а також гідрологічних і ландшафтних характеристик. Для забезпечення порівнюваності показників використано процедуру їх нормування за методом мін-макс перетворення, тоді як вагові коефіцієнти визначалися на основі експертного оцінювання з урахуванням значущості окремих факторів у формуванні екологічного стану територій [6].

У межах дослідження оцінювання екологічної чутливості територій територіальних громад здійснювалося на основі інтегрального підходу, що передбачає агрегування нормованих показників, які характеризують стан природоохоронних територій та елементів охоронюваних ландшафтів. Інтегральний показник екологічної чутливості території визначався як зважена сума окремих параметрів:

$$I_e = \sum_{i=1}^{n} w_i \cdot x_i$$

де I_e — інтегральний показник екологічної чутливості території;

w_i — ваговий коефіцієнт і-го показника;

x_i — нормоване значення і-го показника;

n — кількість показників.

Для інтерпретації отриманих значень інтегрального показника застосовано шкалу екологічної чутливості територій:

- 0,00–0,25 — низька чутливість;
- 0,26–0,50 — помірна чутливість;
- 0,51–0,75 — підвищена чутливість;
- 0,76–1,00 — висока чутливість.

Система показників, використаних для розрахунку інтегрального індексу, наведена у таблиці 1.

Запропонований методичний підхід дозволяє комплексно врахувати як кількісні, так і якісні характеристики територій, що є особливо важливим у процесі стратегічної екологічної оцінки. Його застосування сприяє об'єктивізації прийняття управлінських рішень, дозволяє виявляти екологічно вразливі ділянки та формувати обґрунтовані обмеження щодо використання територій у документах планування територіальних громад.

Викладення основного матеріалу. У сучасних умовах трансформації системи просторового планування та управління територіальним розвитком особливого значення набуває інтеграція екологічних пріоритетів у процеси прийняття стратегічних рішень на рівні територіальних громад. Одним із ключових інструментів забезпечення такої інтеграції є СЕО, яка дозволяє враховувати потенційні впливи на довкілля ще на етапі розроблення документів державного планування. У цьому контексті природоохоронні території та елементи охоронюваних ландшафтів виступають не лише як об'єкти збереження, але і як структуроутворюючі компоненти екологічного каркасу території, що визначають екологічні обмеження та можливості її подальшого розвитку [8].

Природоохоронні території, представлені об'єктами ПЗФ різних категорій, формують основу різнорівневої екологічної мережі та забезпечують збереження природних екосистем, біотичного та ландшафтного різноманіття. Їх просторове розміщення, площа, ступінь ізольованості та функціональні характеристики безпосередньо впливають на формування екологічної стійкості територій. Водночас ефективність їх функціонування значною мірою залежить від наявності екологічних коридорів та буферних зон, роль яких виконують елементи охоронюваних ландшафтів, що не завжди мають формалізований правовий статус.

До таких елементів належать водоохоронні зони, прибережні захисні смуги, лісові масиви, полезахисні лісосмуги, природні лучні та болотні

Таблиця 1

Система показників оцінювання екологічної чутливості територій у контексті СЕО

№	Показник	Позначення	Одиниця виміру	Характер впливу	Орієнтовна вага
1	Частка територій ПЗФ	X_1	%	прямий	0,20
2	Щільність зелених насаджень	X_2	га/км²	прямий	0,15
3	Рівень фрагментації природних ландшафтів	X_3	коеф.	обернений	0,15
4	Рівень антропогенного навантаження	X_4	бали	обернений	0,20
5	Наявність водоохоронних зон і прибережних захисних смуг	X_5	%	прямий	0,10
6	Ландшафтне різноманіття	X_6	індекс	прямий	0,10
7	Ступінь урбанізації території	X_7	%	обернений	0,10

комплекси, а також урбанізовані зелені зони. Вони забезпечують просторову зв'язність екосистем, виконують функції природних фільтрів, регулюють гідрологічний режим територій та сприяють підтриманню сприятливих мікрокліматичних умов. У межах територіальних громад такі елементи часто зазнають трансформації під впливом господарської діяльності, що зумовлює необхідність їх обов'язкового врахування у процедурах СЕО [7].

Інтеграція природоохоронних територій у систему СЕО передбачає їх врахування на всіх етапах підготовки та реалізації документів планування. На початковому етапі, пов'язаному з визначенням обсягу СЕО, здійснюється інвентаризація об'єктів ПЗФ та елементів охоронюваних ландшафтів із використанням геоінформаційних технологій. Це дозволяє сформувати просторову базу даних, яка відображає екологічний каркас території та слугує основою для подальшого аналізу.

На етапі підготовки звіту СЕО особлива увага приділяється оцінюванню впливу планованої діяльності на природоохоронні території. Такий аналіз включає визначення прямих, опосередкованих та кумулятивних впливів, оцінку ризиків фрагментації екосистем, порушення міграційних шляхів видів, зміни гідрологічного режиму та деградації природних комплексів. Важливим є також аналіз альтернативних варіантів розвитку території з урахуванням екологічних обмежень, що дозволяє обрати найбільш збалансоване рішення.

Ключовим елементом удосконалення процедур СЕО є застосування кількісних методів оцінювання, зокрема інтегральних показників екологічної чутливості територій. Використання таких показників забезпечує об'єктивізацію процесу оцінювання та дозволяє порівнювати різні територіальні одиниці за рівнем екологічного ризику. У поєднанні з геоінформаційним аналізом це дає можливість ідентифікувати зони з підвищеною екологічною вразливістю, які потребують встановлення особливого режиму використання або обмеження господарської діяльності.

Практичне застосування запропонованого підходу передбачає проведення просторового зонування території громади з виділенням функціональних зон різного рівня екологічної чутливості. Зокрема, території з високим значенням інтегрального показника повинні розглядатися як зони пріоритетної охорони, де будь-яка господарська діяльність має бути суттєво обмежена або заборонена. Натомість території з низьким рівнем чутливості можуть використовуватися для розвитку інфраструктури за умови дотримання екологічних стандартів.

Особливого значення набуває врахування природоохоронних територій у процесі прийняття управлінських рішень, що здійснюється після завершення процедури СЕО. Результати оцінювання повинні бути інтегровані у містобудівну документацію та стратегії розвитку територіальних громад у вигляді конкретних обмежень, рекомендацій та заходів щодо охорони довкілля. Це включає встановлення охоронних зон, регламентацію використання земель, відновлення деградованих екосистем та розвиток екологічної інфраструктури.

Практичне застосування запропонованих підходів доцільно продемонструвати на прикладі Новобілоуської територіальної громади (Чернігівський район, Чернігівська область), яка характеризується наявністю різноманітних природних ландшафтів, зокрема лісових масивів, заплавних територій долини річки Десна, лучних і водно-болотних комплексів. Просторова структура громади сформована під впливом природно-гідрологічних чинників, що обумовлює підвищену екологічну чутливість окремих її ділянок.

У межах громади важливими елементами екологічного каркасу виступають території долини річки Десна, які виконують функції природного регулятора гідрологічного режиму, акумуляції поверхневого стоку та підтримання біорізноманіття. Водночас ці території є вразливими до антропогенного впливу, зокрема внаслідок розорювання, забудови та нераціонального природокористування. У структурі землекористування громади також значну частку займають сільськогосподарські угіддя, що формують додаткове навантаження на природні екосистеми та сприяють їх фрагментації.

Застосування геоінформаційного аналізу дозволило ідентифікувати основні категорії об'єктів ПЗФ та умовно охоронюваних територій у межах громади, до яких віднесено лісові насадження, прибережні захисні смуги, водно-болотні угіддя та природні лучні комплекси. На основі накладання тематичних шарів було визначено зони потенційних екологічних конфліктів, зокрема ділянки перетину сільськогосподарського використання із заплавними територіями та зонами підвищеної гідрологічної вразливості.

Розрахунок інтегрального показника екологічної чутливості для території громади засвідчив значну просторову диференціацію цього показника. Найвищі значення характерні для заплавних ділянок річок Білоус, Стрижень та прилеглих водно-болотних угідь, що обумовлено високим рівнем біорізноманіття, складною гідрологічною структурою та низькою стійкістю до антропогенних впливів. Території із середнім рівнем чутливості представлені переважно лісовими масивами та ділянками з частково трансформованими природними ландшафтами. Низький рівень екологічної чутливості характерний для інтенсивно освоєних сільськогосподарських угідь та урбанізованих територій.

Отримане значення інтегрального показника екологічної чутливості для території Новобілоуської територіальної громади становить 0,545, що відповідає підвищеному рівню екологічної чутливості. Це свідчить про наявність значного природоохоронного

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

Таблиця 2

Розрахунок інтегрального показника екологічної чутливості території (на прикладі Новобілоуської територіальної громади)

№	Показник	Позначення	Фактичне значення X_i	Нормоване значення x_i	Вага w_i	Зважене значення $w_i \times x_i$
1	Частка територій ПЗФ	X_1	12,5 %	0,63	0,20	0,126
2	Щільність зелених насаджень	X_2	18,2 га/км²	0,61	0,15	0,092
3	Фрагментація ландшафтів	X_3	0,48	0,52	0,15	0,078
4	Антропогенне навантаження	X_4	0,65	0,35	0,20	0,070
5	Водоохоронні території	X_5	9,8 %	0,49	0,10	0,049
6	Ландшафтне різноманіття	X_6	0,72	0,72	0,10	0,072
7	Ступінь урбанізації	X_7	14,3 %	0,58	0,10	0,058
	Всього				1,00	0,545

потенціалу території, а також про необхідність обмеження інтенсивного господарського освоєння окремих ділянок, насамперед у межах заплавних територій долини річки Десни та суміжних водно-болотних угідь.

Аналіз структури інтегрального показника показує, що найбільший внесок у формування екологічної чутливості мають показники частки природно-заповідного фонду та щільності зелених насаджень, що підтверджує важливу роль природних екосистем у забезпеченні екологічної стійкості території. Водночас відносно низькі значення нормованих показників антропогенного навантаження та фрагментації свідчать про наявність потенційних ризиків деградації ландшафтної структури.

Отримані результати дозволили провести функціональне зонування території громади з виділенням зон пріоритетної охорони, регульованого використання та господарського освоєння, зокрема, заплавні території та водно-болотні комплекси віднесено до зон суворого екологічного контролю, де рекомендовано обмежити будь-яку діяльність, що може призвести до зміни гідрологічного режиму або деградації природних екосистем. Для лісових масивів доцільним є впровадження режиму сталого природокористування, тоді як на сільськогосподарських землях рекомендовано застосування ґрунтозахисних технологій та створення екологічних буферних зон.

Інтеграція зазначених результатів у процедури стратегічної екологічної оцінки документів планування Новобілоуської територіальної громади дозволяє підвищити обґрунтованість планувальних рішень, мінімізувати ризики негативного впливу на довкілля та забезпечити збереження ключових елементів екологічного каркасу.

Таким чином, природозаповідні території та елементи охоронюваних ландшафтів виступають ключовими компонентами екологічного каркасу територій, інтеграція яких у процедури стратегічної екологічної оцінки забезпечує підвищення екологічної обґрунтованості планувальних рішень. Використання комплексного підходу, що поєднує просторовий аналіз, інтегральне оцінювання та принципи ландшафтного планування, дозволяє мінімізувати негативний вплив на довкілля та сприяє реалізації концепції сталого розвитку територіальних громад.

Головні висновки. У результаті проведеного дослідження обґрунтовано, що природоохоронні території та елементи охоронюваних ландшафтів є ключовими структуроутворюючими компонентами екологічного каркасу територій і повинні розглядатися як базовий елемент у системі стратегічної екологічної оцінки документів планування територіальних громад. Встановлено, що їх інтеграція у процедури СЕО забезпечує підвищення екологічної обґрунтованості планувальних рішень, сприяє мінімізації негативного впливу господарської діяльності та створює передумови для досягнення збалансованого розвитку територій.

Доведено, що сучасна практика проведення СЕО в Україні характеризується недостатнім рівнем врахування як об’єктів природно-заповідного фонду, так і елементів охоронюваних ландшафтів, що не мають чітко визначеного правового статусу, але виконують важливі екосистемні функції. Це зумовлює необхідність впровадження комплексного підходу, який передбачає поєднання ландшафтного, екосистемного та просторово-аналітичного підходів у межах процедур СЕО.

Запропонований у роботі методичний підхід до оцінювання екологічної чутливості територій на основі інтегрального показника дозволяє кількісно врахувати вплив ключових природних і антропогенних факторів, забезпечує об’єктивізацію процесу

оцінювання та створює основу для порівняльного аналізу різних територій. Використання нормування показників та експертного визначення вагових коефіцієнтів дозволяє адаптувати методику до конкретних умов територіальних громад та підвищує її прикладну цінність.

На прикладі Новобілоуської територіальної громади встановлено, що інтегральний показник екологічної чутливості території відповідає підвищеному рівню, що зумовлено значною часткою природних ландшафтів, наявністю заплавних територій річок басейну Десни та водно-болотних угідь, а також впливом антропогенного навантаження, пов'язаного із сільськогосподарським освоєнням території. Просторовий аналіз дозволив ідентифікувати зони з різним рівнем екологічної чутливості та обґрунтувати доцільність їх функціонального зонування з виділенням територій пріоритетної охорони, регульованого використання та господарського освоєння.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання при розробці стратегій розвитку територіальних громад, комплексних планів просторового розвитку та іншої містобудівної документації, а також у вдосконаленні процедур СЕО. Запропонований підхід дозволяє формувати науково обґрунтовані рекомендації щодо встановлення екологічних обмежень, оптимізації структури землекористування, збереження біорізноманіття та підвищення екологічної безпеки територій.

Отже, інтеграція природоохоронних територій та елементів охоронюваних ландшафтів у систему СЕО є необхідною умовою ефективного управління територіальним розвитком на засадах сталості. Подальші наукові дослідження доцільно спрямувати на розробку геоінформаційних моделей підтримки прийняття рішень, удосконалення методів оцінювання кумулятивних впливів, а також розширення практики застосування інтегральних показників із урахуванням регіональних природно-географічних особливостей та екологічних процесів.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати дослідження можуть бути використані органами місцевого самоврядування та розробниками містобудівної документації при підготовці стратегій розвитку територіальних громад, комплексних планів просторового розвитку та звітів про стратегічну екологічну оцінку (СЕО). Запропоновані підходи забезпечують більш повне врахування природоохоронних територій і елементів охоронюваних ландшафтів, підвищують якість екологічного аналізу та обґрунтованість управлінських рішень.

Практичне застосування результатів сприятиме зниженню екологічних ризиків, збереженню біорізноманіття та формуванню цілісної екологічної мережі на рівні громад. Отримані напрацювання можуть бути використані для вдосконалення методичного забезпечення СЕО, розробки рекомендацій щодо інтеграції ландшафтного підходу та впровадження геоінформаційних систем у процеси планування.

Крім того, результати дослідження можуть застосовуватися у навчальному процесі та подальших наукових розробках у сфері екологічного планування.

Література

1. Карпенко Ю.О., Свердлов В.О. Параметри навколишнього середовища як базові компоненти формування звітних документів стратегічної екологічної оцінки технічної документації територіальних громад. *Український журнал природничих наук*. 2025. № 14. С. 328–336. https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.30
2. Карпенко Ю.О., Свердлов В.О.Реалізація цілей сталого розвитку в акценті на регіональні екологічні проблеми. Український журнал природничих наук. 2025. № 12.С. 361–370. https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.36
3. Кононенко І. Державна екологічна політика в умовах децентралізації влади в Україні. Геополітика України: історія і сучасність. 2021. № 2(27). С. 67–74.https://doi.org/10.24144/2078-1431.2021.2(27).67-74
4. Методичні рекомендації із здійснення стратегічної екологічної оцінки документів державного планування. [Електронний ресурс]. URL:https://www.ecorivne.gov.ua/tmp/nakaz_CEO_296.pdf (дата звернення: 09.04.2026).
5. Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030року: Закон України від 28.02.2019.[Електронний ресурс]. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text (дата звернення: 13.10.2025). Про стратегічну екологічну оцінку : Закон України від 20.03.2018. [Електронний ресурс]. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2354-19#Text (дата звернення: 08.04.2026).
6. Стратегічна екологічна оцінка комплексного плану. [Електронний ресурс]. URL: https://decentralization.ua/uploads/library/file/819/SEO_ready.pdf?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 16.04.2026).
7. Rudenko L.H. experience of strategic environmental assessment in the planning process in Ukraine. *Ukrainian Geographical Journal*. 2016. Vol. 2016, №2. P.03–12. URL: https://doi.org/10.15407/ugz2016.02.003 (date of access: 01.04.2026).
8. Strategic ecological assessment of Ukraine's Reconstruction Projects – Ecoclub Rivne is an environmental NGO. [Електронний ресурс]. URL: https://ecoclubrivne.org/en/sea-changes-to-the-law/?utm_source=chatgpt.com (дата звернення 23.04.2026)

Дата першого надходження статті до видання: 30.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 633.1.631.81
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.40

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПРАКТИК ВЕРИФІКАЦІЯ ВИКИДІВ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ГАРМОНІЗАЦІЇ

Лукіна Є.В., Волошина Н.О.
Український державний університет імені Михайла Драгоманова
вул. Пирогова, 9, 02000, м. Київ
elukina2004@gmail.com, n.o.voloshyna@udu.edu.ua

Стаття присвячена комплексному дослідженню сучасного стану систем верифікації викидів парникових газів (ПГ) в Україні та Європейському Союзі в контексті євроінтеграційних прагнень нашої держави та наближення введення механізму коригування вуглецевого кордону ЄС (CBAM) з 2026 року. **Метою статті** є здійснення системного порівняльного аналізу нормативно-правових і методологічних засад верифікації відповідно до стандартів ЄС – Директиви 2003/87/ЄС, Регламенту (ЄС) 2018/2066 та ISO 14064-3:2019 – і чинного українського законодавства. **Методологія дослідження** базується на системному аналізі, порівняльно-правовому та матричному методах. **Наукова новизна** полягає у систематизації відмінностей між MRV-системами ЄС та України, розробці порівняльної матриці ключових параметрів верифікації за десятьма критеріями (правова основа, акредитація органів, метод моніторингу, поріг суттєвості, санкційні механізми тощо) та формуванні тривимірної дорожньої карти гармонізації у трьох часових горизонтах: 2025–2027, 2028–2031 та 2032+. Виявлено, що Україна охоплює лише 11 категорій діяльності, що підлягають MRV, тоді як ЄС включає понад 30. Встановлено принципові розбіжності в акредитації верифікаційних органів, застосуванні систем безперервного моніторингу емісій (CEMS), методиках оцінки суттєвості невідповідностей та санкційних механізмах. Окремо розглянуто особливі умови для операторів, чиї установки зазнали руйнувань унаслідок збройної агресії. Обґрунтовано доцільність формування Єдиного реєстру МЗВ через платформу Дія з подальшою інтеграцією з Європейською платформою ETS. Результати дослідження мають практичне значення для органів державного управління, НААУ, акредитованих верифікаторів та промислових операторів. *Ключові слова:* парникові гази, верифікація, EU ETS, MRV, CEMS, євроінтеграція, гармонізація, ISO 14064, моніторинг викидів, кліматична політика.

A comparative analysis greenhouse gas emissions verification and harmonisation prospects. Lukina Y., Voloshyna N.
The article presents a comprehensive study of the current state of greenhouse gas (GHG) verification systems in Ukraine and the European Union in the context of Ukraine's European integration aspirations and the imminent introduction of the EU Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) from 2026. **The aim of the article** is to conduct a systematic comparative analysis of the regulatory and methodological foundations of verification under EU standards – Directive 2003/87/EC, Regulation (EU) 2018/2066, and ISO 14064-3:2019 – alongside current Ukrainian legislation. **The research methodology** is based on systemic analysis, comparative legal analysis, and a matrix-based approach. **The scientific novelty** consists in systematising the differences between EU and Ukrainian MRV systems, developing a comparative parameter matrix across ten key verification criteria – including legal basis, accreditation of verifiers, monitoring methodology, materiality thresholds, and sanctioning mechanisms – and formulating a three-dimensional harmonisation roadmap across three time horizons: 2025–2027, 2028–2031, and 2032 onwards. The study reveals that Ukraine currently covers only 11 categories of activities subject to MRV, compared to over 30 in the EU. Significant structural divergences were identified in verification body accreditation procedures, the application of continuous emissions monitoring systems (CEMS), materiality assessment methodologies, and enforcement mechanisms. Special regulatory conditions applicable to operators whose installations have been damaged or destroyed as a result of armed aggression are examined separately. The article substantiates the expediency of establishing a unified MRV register through the Diia platform with subsequent integration into the European ETS platform. The research findings are of practical relevance for public authorities, the National Accreditation Agency of Ukraine, accredited verifiers, and industrial operators subject to future ETS regulation. *Key words:* greenhouse gases, verification, EU ETS, MRV, CEMS, European integration, harmonisation, ISO 14064, emissions monitoring, climate policy.

Кліматична криза є одним із найбільш гострих викликів сучасності, що потребує консолідованих зусиль на глобальному та регіональному рівнях. Ключове місце в кліматичній політиці посідає достовірний облік антропогенних викидів парникових газів (ПГ), що дозволяє ефективно регулювати промислові емісії, здійснювати торгівлю квотами, звітувати перед міжнародними органами [1]. Верифікація – незалежна перевірка заявлених обсягів викидів виступає важливим механізмом забезпечення якості та довіри до такої звітності.

Україна, підписавши Угоду про асоціацію з ЄС та задекларувавши курс на євроінтеграцію, взяла на себе зобов'язання з поступового приведення національного екологічного законодавства у відповідність до «acquis communautaire». Це стосується, зокрема, впровадження системи торгівлі викидами (EU ETS) та супровідних MRV-стандартів. Водночас, вітчизняна система верифікації ПГ перебуває на початковому етапі формування і суттєво відрізняється від усталених європейських практик. Запровадження механізму коригування вуглецевого кордону ЄС

© Лукіна Є.В., Волошина Н.О., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

(CBAM) з 2026 р. означає, що українські експортери вже найближчим часом зіткнуться з практичними вимогами щодо верифікованої вуглецевої звітності [2].

Питання функціонування EU ETS та супровідних MRV-механізмів широко досліджуються у зарубіжній науковій літературі. Зокрема, Ellerman A. D., Convery F. J. та de Perthuis C. детально проаналізували архітектуру системи торгівлі викидами ЄС [3]. Dechezleprêtre A. та Sato M. дослідили ефективність EU ETS з погляду стимулювання низьковуглецевих інновацій [4]. Koch N. et al. оцінили вплив верифікаційних процедур на цінову динаміку ринку вуглецевих одиниць [5]. Серед вітчизняних досліджень Жарова Л. В. та Хлобистов Є. В. дослідили еколого-економічні засади кліматичної політики України [6], Буркинський Б. В. та Галушкіна Т. П. аналізували перспективи «зеленої» економіки в контексті євроінтеграції [7]. Водночас, спеціальних порівняльних досліджень, присвячених саме верифікаційним практикам ПГ в аспекті гармонізації України і ЄС, у вітчизняній науковій літературі недостатньо.

Виклад основного матеріалу. Система EU ETS функціонує з 2005 р. і регулює викиди понад 10 000 промислових установок та авіаційних операторів у 30 країнах. Правову основу верифікації складають: Директива 2003/87/ЄС (зі змінами), Акредитаційний регламент (ЄС) 2018/2067 та Регламент MRV (ЄС) 2018/2066. На рівні стандартизації застосовуються ISO 14064-1:2018 (звітність), ISO 14064-3:2019 (верифікація) та IPCC Guidelines (коефіцієнти емісій).

Верифікаційний орган у системі EU ETS повинен бути акредитований національним органом з акредитації відповідно до Регламенту (ЄС) 765/2008 та стандарту EN ISO/IEC 17029:2019. Процедура верифікації передбачає стратегічний аналіз, аналіз ризиків, аудит на місці, перевірку розрахунків і складання звіту верифікатора [8]. Суттєвість невідповідностей визначається на рівні 5 % від сукупних задекларованих викидів, хоча для окремих категорій установок передбачені більш суворі пороги.

Система безперервного моніторингу емісій (CEMS) широко застосовується в ЄС для великих генеруючих і промислових установок. CEMS є обов'язковою у випадках, коли розрахунковий метод не забезпечує достатньої точності. Вимоги до якості даних CEMS визначаються стандартами серії EN 14181 та QAL-процедурами, що забезпечує вимірювання концентрації ПГ у режимі реального часу та формує верифіковані масиви даних [9].

В Україні нормативно-правова база верифікації ПГ формується в рамках ратифікованих міжнародних угод (Паризька угода, 2016 р.) та імплементаційного законодавства. Чинна нормативно-правова база охоплює Закон України «Про засади моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів» (2019 р.) та Закон України «Про внесення змін до деяких законів України щодо відновлення моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів» (2025 р.) [10], накази Центрального органу виконавчої влади з питань екології щодо методичних настанов з MRV.

Національна система торгівлі квотами на викиди парникових газів була відновлена під час воєнного стану в Україні, що обумовлено наближенням до стандартів ЄС в контексті європейської інтеграції, але з урахуванням реальних умов, зокрема, наданням особливих умов операторам, чиї установки розташовані на тимчасово окупованих або прифронтових територіях чи зазнали руйнування внаслідок збройної агресії [10].

Постановою КМУ від 23.09. 2020 р. № 880 було затверджено перелік видів діяльності, викиди парникових газів в результаті провадження яких підлягають моніторингу, звітності та верифікації. До їх складу включено 11 видів діяльності пов'язаних зі спалюванням палива в установках; переробкою нафти; виробництвом коксу, чавуну або сталі; випалювання або спікання, в тому числі агломерація металевої руди; виробництвом або обробкою залізовмісних сплавів; виробництвом цементного клінкеру в обертових випалювальних печах, вапна або кальцинація доломіту або магнезиту в печах, азотної кислоти, аміаку, скла, включаючи скловолокно [11].

Перелік видів діяльності, що підлягає верифікації парникових газів в ЄС є значно ширшим, розділений на чотири основні сектори, які охоплюють понад 30 категорій діяльності, зокрема, включає усі види транспорту (авіа, водний та дорожній), спалювання палива для опалення, целюлозно-паперову промисловість та ін. Перелік видів діяльності має тенденцію до розширення, періодичного перегляду, з включенням нових категорій діяльності як, наприклад, викиди від спалювання палива в муніципальних сміттєспалювальних заводах або верифікацію і контроль фторованих парникових газів та озоноруйнівних речовин.

До основних парникових газів відносять: двоокис вуглецю (CO_2), метан (CH_4), закис азоту (N_2O), гідрофторовуглеці (ГФВ), перфторвуглеці (ПФВ) та гексафторид сірки (SF_6) (за даними державної служби статистики України. Водночас, перелік сполук і речовин, які сприяють глобальному потеплінню і виснаженню озонового шару розширюється. Так, у 2024 р. Рада ЄС долучила до переліку фторовані парникові гази (F-гази) (гідрофторвуглеці (HFC), перфторвуглеці (PFC) і гексафторид сірки ($SF)_6$)) та озоноруйнівні речовини (ODS), які утворюються при роботі холодильних установок, кондиціонерів, теплових насосів, розподільних пристрів в електроенергетичних системах, при виготовленні ліків та широкого асортименту продуктів [12].

Акредитація верифікаційних органів здійснюється Національним агентством з акредитації

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

України (НААУ) відповідно до вимог ISO 17029, проте загальна кількість акредитованих органів залишається незначною.

Принципові відмінності між системами верифікації ЄС та України унаочнено в таблиці.

Аналіз наведених даних свідчить про системний характер розриву між двома системами верифікації ПГ в ЄС та Україні.

Ще одним критичним аспектом є інституційна спроможність верифікаційних органів. В ЄС ринок верифікаційних послуг є конкурентним: понад 200 акредитованих органів спеціалізуються на різних секторах. В Україні ринок верифікаційних послуг перебуває у стадії становлення, кваліфікований персонал верифікаторів обмежений, і в перехідний етап Національне агентство з акредитації України забезпечує проведення планових наглядів за діяльністю акредитованих верифікаторів.

На основі проведеного аналізу запропоновано тривимірну дорожню карту гармонізації системи верифікації ПГ України з вимогами ЄС, структуровану за трьома часовими горизонтами. Перший горизонт (2025–2027): нормативна консолідація – розробка технічних регламентів щодо вимог до верифікаційних органів (на основі Регламенту 2018/2067), унормування суттєвості невідповідностей, методичних рекомендацій із CEMS, розширення можливостей НААУ. Другий горизонт (2028–2031): інституційна розбудова – збільшення кількості акредитованих органів, запровадження системи навчання та сертифікації верифікаторів, підключення до мережі EA/IAF, побудова пілотного ETS. Третій горизонт (2032+): повна інтеграція – участь у EU ETS або пов'язаній системі, повна операційна сумісність з EUTL, застосування CEMS на всіх об'єктах-аналогах установок Додатку I Директиви.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика систем верифікації ПГ в ЄС та Україні

Параметр	ЄС (EU ETS)	Україна
Правова основа	Директива 2003/87/ЄС, Рег. (ЄС) 2018/2066, 2018/2067	Закон «Про MRV» (2019), накази МЗПР
Стандарт верифікації	EN ISO/IEC 17029:2019, ISO 14064-3:2019	ISO 14064-3:2019 (впроваджується)
Акредитація органів	Обов'язкова, EA/IAF MLA, понад 200 органів	Обов'язкова через НААУ, обмежена кількість
Метод моніторингу	Розрахунковий або CEMS (залежно від рівня)	Переважно розрахунковий
Поріг суттєвості	5% від сукупних викидів (стандартно)	Не унормовано чітко
Звітний цикл	Річний (до 31 березня)	Річний (формується)
Реєстрова система	EUTL (EU Transaction Log)	Національний реєстр (розробляється)
Санкції за порушення	Штраф 100 євро/т CO_2 + публікація	Система санкцій формується
CEMS	Широко застосовуються (EN 14181)	Обмежене використання
Інтеграція з E-PRTR	Повна	Часткова (формується)

Не менш важливим для забезпечення прозорості та цифровізації даних є формування Єдиного реєстру з моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів через портал Дія з подальшою його інтеграцією з Європейською платформою ETS (Emissions Trading System). В Єдиному реєстрі з моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів представлено інформацію щодо реєстрації установок, з яких здійснюються викиди парникових газів, звіт оператора, план моніторингу та зміни до нього (за наявності), звіт про вдосконалення, верифікаційний звіт, відомості про оператора установки, відомості про установку.

Висновки. Між системами верифікації ПГ ЄС та України існує системний регуляторний розрив, що охоплює нормативну базу, інституційну спроможність, методологію моніторингу і технологічну інфраструктуру. Подолання цього розриву є необхідною умовою участі України в EU ETS та CBAM-сумісній торгівлі. Запропонована тривимірна дорожня карта (2025–2027, 2028–2031, 2032+) дозволяє структурувати адаптаційні заходи у нормативному, інституційному та технологічному вимірах. Критичними чинниками успіху гармонізації є: послідовне впровадження «acquis communautaire» у сфері кліматичної політики; достатнє фінансування програм розбудови інституційної спроможності; активне залучення міжнародних донорів і технічної допомоги ЄС. Результати дослідження можуть бути використані МЗПР при розробці нормативних актів з верифікації ПГ, НААУ при вдосконаленні процедур акредитації, а також промисловими підприємствами, що підпадатимуть під регулювання майбутнього ETS.

Література

1. Паризька угода. Рамкова конвенція ООН про зміну клімату, 2015. URL: https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement
2. Regulation (EU) 2023/956 of the European Parliament and of the Council of 10 May 2023 establishing a carbon border adjustment mechanism. *Official Journal of the European Union.*2023. P. 52–104.
3. Ellerman A. D., Convery F. J., de Perthuis C. Pricing Carbon: The European Union Emissions Trading Scheme. *Cambridge University Press*. 2010. 392 p.
4. Dechezleprêtre A., Sato M. The Impacts of Environmental Regulations on Competitiveness. *Review of Environmental Economics and Policy.* 2017. Vol. 11, № 2. P. 183–206. DOI: https://doi.org/10.1093/reep/rex013
5. Koch N., Fuss S., Grosjean G., Edenhofer O. Causes of the EU ETS price drop: Recession, CDM, renewable policies or a broken trading system? *Energy Policy.* 2014. Vol. 73. P. 676–685. DOI: doi.org/10.1016/j.enpol.2014.06.024 .
6. Жарова Л. В., Хлобистов Є. В. Еколого-економічні засади кліматичної політики України в контексті сталого розвитку. *Економіка України.* 2019. № 8. С. 50–63.
7. Буркинський Б. В., Галушкіна Т. П. Зелена економіка крізь призму трансформацій і можливостей в контексті євроінтеграційного курсу України. Одеса : ІПРЕЕД НАН України, 2018. 760 с.
8. Commission Implementing Regulation (EU) 2018/2067 of 19 December 2018 on the verification of data and on the accreditation of verifiers pursuant to Directive 2003/87/EC. *Official Journal of the European Union.* L 334. 2018. P. 94–134.
9. Закон України «Про засади моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів» від 12 грудня 2019 р. № 377-IX. *Відомості Верховної Ради України.* 2020. № 12. 67 с.
10. Закон України «Про внесення змін до деяких законів України щодо відновлення моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів» від 08 січня 2025 р. № 4187-IX. *Відомості Верховної Ради України.* 2025. № 28. 91 с.
11. Постанова Кабінету Міністрів України «Про затвердження переліку видів діяльності, викиди парникових газів в результаті провадження яких підлягають моніторингу, звітності та верифікації» від 23 вересня 2020 р. № 880-2020-п URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/880-2020-%D0%BF
12. Регламент (ЄС) № 2024/573 Європейського Парламенту та Ради від 7 лютого 2024 року про фторовані парникові гази, що вносить зміни до Директиви (ЄС) 2019/1937 та скасовує Регламент (ЄС) № 517/2014 URL: http://data.europa.eu/eli/reg/2024/573/oj

Дата першого надходження статті до видання: 17.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

UDC 712.4:58.006:630*5:502.4
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.41

SCIENTIFIC AND PRACTICAL ASPECTS OF THE RECONSTRUCTION OF GREEN PLANTINGS IN THE "PODILLIA" BOTANICAL GARDEN OF VINNYTSIA NATIONAL AGRARIAN UNIVERSITY

Piddubna A.M., Pankova S.O., Matusiak M.V.
Vinnytsia National Agrarian University
Soniachna St. 3, 21000, Vinnytsia
pankovavnau@gmail.com

The study established that during the formation of plant associations in the "Podillia" Botanical Garden of Vinnytsia National Agrarian University, insufficient consideration was given to the intensity of interspecific interactions among woody species, their bioecological characteristics, and their correspondence to soil and climatic conditions. This resulted in the formation of unstable phytocoenoses, where suppression of certain tree species by others, disruption of optimal stand structure, and excessive stand density were observed.

The research was based on field surveys, the establishment of sample plots, and the assessment of woody plantings using key biometric and sanitary indicators, including defoliation, dechromation, and crown density. During the sanitary and aesthetic evaluation of forest associations, particular attention was focused on mixed stands composed of several woody species, which are the most vulnerable to interspecific interactions.

Based on the obtained results and the analysis of scientific literature, it was determined that a portion of the plantings is in unsatisfactory or hazardous condition and requires the implementation of comprehensive reconstruction measures. The main causes of deterioration were identified, including interspecific competition, mismatch between species ecological requirements and environmental conditions, as well as increased sensitivity to biotic and abiotic stress factors.

In this regard, a reconstruction plan was developed for selected areas of the "Podillia" Botanical Gardenю. In this regard, a reconstruction plan was developed for selected areas of the "Podillia" Botanical Garden, which provides for the optimization of species composition through the removal of weakened, suppressed, and dead trees.

The replacement of certain species with more environmentally adapted woody plants is proposed. In particular, the planting of Douglas fir (Pseudotsuga menziesii) and western red cedar (Thuja plicata) is recommended, as these species are characterized by high ecological plasticity, resistance to pests and diseases, and significant ornamental value.

The implementation of the proposed measures will contribute to improving the sanitary condition, increasing biological stability, and enhancing the aesthetic value of green plantings in the botanical garden, as well as ensuring more efficient functioning of the site as a scientific and conservation facility. *Key words:* reconstruction, botanical garden, forest associations, monitoring, defoliation, dechromation.

Науково-практичні аспекти реконструкції зелених насаджень ботанічного саду «Поділля» Вінницького національного аграрного університету. Піддубна А.М., Панкова С.О., Матусяк М.В.

У ході дослідження встановлено, що під час формування рослинних асоціацій у ботанічному саду «Поділля» Вінницького національного аграрного університету недостатньо враховувалися інтенсивність міжвидових взаємодій деревних порід, їх біоекологічні особливості, а також відповідність екологічним вимогам до ґрунтово-кліматичних умов. Це зумовило формування нестійких фітоценозів, у яких спостерігається пригнічення одних деревних видів іншими, порушення оптимальної структури насаджень та їх надмірне загущення.

Дослідження базувалися на польових обстеженнях, закладанні пробних площ та оцінці стану деревних насаджень за основними біометричними та санітарними показниками, зокрема рівнем дефоліації, дехромації та щільністю крон. Під час проведення санітарної та естетичної оцінки лісових асоціацій особливу увагу було зосереджено на змішаних насадженнях, сформованих за участю кількох деревних порід, які є найбільш вразливими до внутрішньоценотичних взаємодій.

На основі отриманих результатів та аналізу наукових джерел встановлено, що частина насаджень перебуває в незадовільному або аварійному стані, що потребує проведення комплексних реконструктивних заходів. Визначено основні причини погіршення стану насаджень, серед яких домінують міжвидова конкуренція, невідповідність екологічних умов вимогам окремих видів, а також підвищена чутливість до дії біотичних і абіотичних факторів.

У зв'язку з цим розроблено план реконструкції окремих ділянок ботанічного саду «Поділля», який передбачає оптимізацію породного складу шляхом видалення ослаблених, пригнічених та сухостійних дерев. Запропоновано заміну окремих видів на більш адаптовані до умов регіону деревні породи. Зокрема, рекомендовано висадження саджанців дугласії Мензіса (Pseudotsuga menziesii) та туї складчастої (Thuja plicata), які характеризуються високою екологічною пластичністю, стійкістю до шкідників і хвороб, а також значним декоративним потенціалом.

© Piddubna A.M., Pankova S.O., Matusiak M.V., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Реалізація запропонованих заходів сприятиме покращенню санітарного стану, підвищенню біологічної стійкості та естетичної цінності зелених насаджень ботанічного саду, а також забезпечить більш ефективне функціонування його як науково-дослідного та природоохоронного об'єкта. *Ключові слова:* реконструкція, ботанічний сад, лісові асоціації, моніторинг, дефоліація, дехромація.

Problem statement. Botanical gardens are important sites for biodiversity conservation and represent a wide range of plant species. The primary purpose of establishing botanical gardens is not only to preserve valuable native species, but also to propagate and cultivate rare introduced plants.

The "Podillia" Botanical Garden of Vinnytsia National Agrarian University was established in the early 1960s. Its main purpose was scientific and educational. Forest associations were established within the Botanical Garden, representing not only the flora of Podillia, but also that of the Carpathians, Polissia, the United States, and Canada.

Analysis of recent research and publications. The specific features of monitoring and reconstructing green plantings in botanical gardens have been studied by a number of foreign and domestic scientists. Among them, a significant contribution has been made by the works of A. V. Hudzevych, Yu. M. Yukhnovskyi, and I. F. Buksha.

The aim of the study is to conduct monitoring and assess the condition of woody species in order to implement reconstruction measures aimed at improving the aesthetic and architectural–planning state of the site.

Research methodology. Direct investigations of the distribution, composition, and productivity of forest stands were carried out based on forest inventory materials, including mensuration descriptions, forest stand plans, and compartment maps. The assessment of forest ecosystems was conducted using established permanent sample plots. These plots were laid out in the most representative forest associations. The size of each plot was determined to ensure the presence of at least 50 trees for measurement and inventory purposes. For each tree, diameter, height, condition, and specific features of growth and development were recorded [3].

Main body of the study. At the present stage, an expansion of the areas occupied by forest associations is observed, while in some of them significant changes in species composition have occurred due to interspecific interactions among woody plants. This is primarily caused by the suppression of certain species by others, leading to structural transformations of the stands.

In this regard, it is advisable to assess the condition of forest associations, particularly those composed of multiple woody species. Such an assessment is necessary to substantiate and implement more effective measures for regulating species composition, including thinning and sanitary cuttings within specific associations, in order to preserve species diversity.

Surveys of pine and spruce stands were conducted. Monitoring plots were established within these forest stands. Each monitoring plot included approximately 50 individual trees, for which indicators were assessed in accordance with the international ICP Forests methodology (Table 1).

According to the given classification, pine stands should be classified as moderately damaged (with defoliation and dechromation levels exceeding 25%), while Norway spruce is considered severely damaged (25–50%). Oak, European beech, and hornbeam are classified as conditionally damaged [1]. The poorest condition is observed in Scots pine and Norway spruce. Table 2 presents data on the dynamics of the condition of the main forest stands of the "Podillia" Botanical Garden over the period 2024–2025 [6].

For Quercus robur, in 2024 the majority of trees were characterized by defoliation levels of up to 10% (22.5%) and 11–25% (22%). In 2025, a notable improvement in condition was observed: the proportion of trees with minimal defoliation (up to 10%) increased to 45.5%, while the share of moderately damaged trees (11–25%) decreased to 10%. At the same time, there was an increase in the proportion of trees with defoliation levels of 26–60% (up to 26.5%) and the emergence of severely damaged individuals (15%), indicating heterogeneity in stand condition [2].

Table 1

Condition of Forest Stands in the "Podillia" Botanical Garden on Monitoring Plots under the ICP Forests Programme (2024–2025)

Tree species	Diameter, cm	Crown spread, %	Kraft class	Defoliation, %	Dechromation%	Crown density,%
Pinus silvestris	24,0	27,3	2,2	12	11	62
Quercus robur	28	39,6	2,4	11	5	78
Fagus sylvatica	17,9	48,3	2,6	7	6	75
Picea abies	17,9	48,3	2,6	35,5	40	58

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

Table 2

Characteristics of Forest Stands by Degree of Defoliation (2023–2025)

Tree species	Defoliation, 10%		Defoliation, 11-25%		Defoliation, 26-60%		Defoliation, 61%	
	Count	%	Count	%	Count	%	Count	%
Quercus robur (2024)	25	22,5	30	22	11	10		
Quercus robur (2025)	40	45,5	5	10	21	26,5	3	15
Picea abies (2024)	2	2,2	12	5,3	33	21,7	2	1,1
Picea abies (2025)	33	27,0	3	1,1	31	20,9	2	1,1
Fagus sylvatica (2024)	20	24,0	23	23,3	3	,4	3	4,4
Fagus sylvatica (2025)	27	85,6	2	2	0	0	4	4,4

In Picea abies stands, trees with high levels of defoliation (26–60% – 21.7%) predominated in 2024, characterizing them as weakened. In 2025, a positive trend was recorded, with the proportion of trees exhibiting defoliation up to 10% increasing to 27%. However, a considerable share of trees remained within the category of moderate damage (26–60% – 20.9%), indicating an unstable condition of spruce stands [7].

For Fagus sylvatica, the most pronounced improvement was observed. In 2024, trees were relatively evenly distributed between defoliation categories up to 10% (24%) and 11–25% (23.3%). In 2025, the vast majority of trees (85.6%) were characterized by minimal defoliation. Notably, no trees were recorded in the 26–60% defoliation category, indicating a high level of vitality of beech stands [5].



Fig. 1. Condition of Douglas fir (Pseudotsuga menziesii) stands in the "Podillia" Botanical Garden of Vinnytsia National Agrarian University

Overall, the obtained data indicate an improvement in the condition of oak and beech stands, whereas Picea abies remains the most vulnerable species, requiring continued monitoring and the implementation of reconstruction measures [5].

Conclusions and prospects for further research.

1. Forest associations of the "Podillia" Botanical Garden of Vinnytsia National Agrarian University occupy an area of 18.21 ha and are represented by more than 32 associative groups involving both native and introduced woody species. The majority of these stands are characterized by high productivity and satisfactory condition, with a typical stand density of approximately 0.7 and a growing stock ranging from 150 to 230 m³/ha.

2. The results of the assessment of mixed forest associations indicate that the deterioration in the condition of certain woody species is обусловлено differences in their biological and ecological characteristics. In particular, the following patterns were identified:

1) suppression of Scots pine by northern red oak, European larch, and pedunculate oak;

2) negative impact of Norway spruce on pedunculate oak and European larch;

3) suppression of sycamore maple and gray walnut by pedunculate oak, as well as the influence of European beech on pedunculate oak;

4) suppression of birch by aspen.

3. Considering the increased levels of defoliation and dechromation in spruce stands, as well as the growing number of dead standing trees, which serve as potential sources of pests and diseases and pose a safety hazard, it is advisable to carry out clear and sanitary selective cuttings [4].

4. It is recommended to plant seedlings of Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) and western red cedar (*Thuja plicata*), which under local conditions can serve as effective alternatives to Norway spruce, as they exhibit greater resistance to pests and diseases.

5. In other associations, in accordance with the reconstruction plan, following the partial removal of diseased and dead trees, it is advisable to introduce recommended assortments of woody species that demonstrate better adaptability to environmental conditions and possess pronounced ornamental qualities.

Prospects for further research lie in the development and improvement of methodological approaches to the reconstruction of green plantings aimed at restoring and preserving the sanitary-hygienic and aesthetic functions of the plantings within the "Podillia" Botanical Garden.

References

1. Бондарук М. А., Орлов О. О., Целіщев О. Г. Оцінка біорізноманіття надґрунтового покриву як показника стійкості лісових екосистем Центрального Полісся до рекреаційних навантажень. Проблеми лісової екології та лісокористування в Українському Поліссі. 2002. Вип. 3(9). С. 22–30.
2. Букша І. Ф., Букша М. І., Пивовар Т. С. Оцінка репрезентативності даних моніторингу лісів України за різної щільності мережі ділянок спостережень. Лісівництво і агролісомеліорація. 2019. Вип. 134. С. 66–77.
3. Матусяк М. В. Дослідження та аналіз складу трав'яного покриву фітоценозів м. Вінниця на прикладі окремих ділянок лісопарку та ботанічного саду ВНАУ. Сільськогосподарські науки. 2019. № 3(67). С. 224–228.
4. Нейко І. С., Оплаканська А. Б., Нейко С. О., Панкова С. О. Особливості функціонування лісонасіннєвих плантацій дуба звичайного (Quercus robur L.) в умовах Правобережного Лісостепу України. Аграрні інновації. 2024. № 25. С. 129–133.
5. Панкова С. О. Біоекологічні основи інтродукції та вирощування видів роду кипарис (Cupressus L.). Таврійський науковий вісник. Серія: Сільськогосподарські науки. 2024. № 136, ч. 2. С. 86–97. DOI: https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.136.2.12
6. Піддубна А. М., Матусяк М. В., Циганська О. І., Панкова С. О. Вплив технології зимового закриття лунок на агрохімічний стан ґрунту під деревними насадженнями в умовах міста Вінниці. Український журнал природничих наук. 2025. № 13. С. 413–420. DOI: https://doi.org/10.32782/naturaljournal.13.2025.39
7. Свириденко В. Є. Рекреаційне лісівництво. Київ: НАУ, 2003. 110 с.

Дата першого надходження статті до видання: 29.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 338.2:332.142.6
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.42

ІНТЕГРАЦІЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ СКЛАДОВОЇ У СТРАТЕГІЇ РОЗВИТКУ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАД: ОСНОВНІ ТЕНДЕНЦІЇ ТА ВИКЛИКИ

Спрягайло О.А., Спрягайло О.В., Лавріненко К.В.
Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького
бульв. Шевченка, 81, 18031, м. Черкаси
biona@ukr.net, dendro@ukr.net, lavrinenkokaterina97@gmail.com

Проаналізовано та узагальнено підходи до інтеграції екологічної складової у стратегії розвитку територіальних громад на прикладі Черкаської області. Оцінено її місце у системі стратегічного планування, рівень інтеграції у стратегічні та оперативні цілі, а також визначено основні тенденції та проблеми її врахування. Методологічну основу дослідження становили контент-аналіз стратегій розвитку громад, порівняльний аналіз та узагальнення отриманих результатів.

Встановлено, що екологічна складова присутня в усіх досліджених стратегіях, однак у більшості випадків інтегрується в інші напрями розвитку і не виступає самостійним пріоритетом. Систематизовано типи її позиціонування у стратегічних цілях громад, зокрема як самостійного пріоритету, компонента якості життя, економічного інструменту та управлінського компонента. Визначено переважання інтеграційної моделі, за якої екологічні аспекти розглядаються здебільшого як інструмент забезпечення комфортних умов проживання, а не як базовий елемент сталого розвитку.

Виявлено, що системні напрями, пов'язані зі збереженням біорізноманіття, розвитком природно-заповідного фонду, адаптацією до змін клімату та екологічним моніторингом, представлені недостатньо. Водночас оперативні цілі переважно орієнтовані на вирішення прикладних комунальних завдань, що зумовлює звуження екологічної складової до окремих заходів. Встановлено неузгодженість між стратегічними та оперативними цілями, що проявляється у відсутності належної конкретизації екологічних пріоритетів на рівні завдань і механізмів реалізації.

Обґрунтовано, що екологічна складова у стратегічному плануванні територіальних громад має фрагментарний характер і не формується як цілісна система, що обмежує можливості комплексного впровадження принципів сталого розвитку на місцевому рівні. Визначено необхідність системного підходу до її інтеграції у стратегічне планування. *Ключові слова:* територіальні громади, стратегічне планування, екологічна складова, сталий розвиток, інтеграція**.**

Integration of the environmental component into territorial community development strategies: key trends and challenges. Spriahailo O.A., Spriahayilo O.V., Lavrinenko K.

The study analyzes and systematizes approaches to the integration of the environmental component into territorial community development strategies using the case of Cherkasy region. The role of the environmental component within the strategic planning system, the level of its integration into strategic and operational objectives, as well as key trends and challenges in its consideration are assessed. The methodological framework of the study consisted of content analysis of community development strategies, comparative analysis, and a synthesis of the results obtained.

It is established that the environmental component is present in all analyzed strategies; however, in most cases it is integrated into other development areas and does not function as an independent priority. The types of its positioning within strategic objectives are systematized, including its interpretation as an independent priority, a component of quality of life, an economic instrument, and a governance component. The predominance of an integration model is identified, in which environmental aspects are mainly considered as a tool for ensuring comfortable living conditions rather than as a core element of sustainable development.

The study reveals that systemic areas such as biodiversity conservation, development of protected areas, climate change adaptation, and environmental monitoring are insufficiently represented. At the same time, operational objectives are primarily focused on addressing applied municipal issues, which narrows the environmental component to isolated measures. A lack of consistency between strategic and operational objectives is identified, manifested in insufficient specification of environmental priorities at the level of tasks and implementation mechanisms.

It is substantiated that the environmental component in the strategic planning of territorial communities has a fragmented character and does not form a coherent system, which limits the possibilities for the comprehensive implementation of sustainable development principles at the local level. The necessity of adopting a systemic approach to its integration into strategic planning is identified. *Key words:* territorial communities, strategic planning, environmental component, sustainable development, integration.

Постановка проблеми. Попри зростаючу роль стратегічного планування у розвитку територіальних громад [1-3], практика його реалізації свідчить про наявність низки проблем, пов'язаних із недостатньою інтеграцією екологічної складової. Зокрема, у більшості стратегій розвитку екологічні аспекти мають формальний або фрагментарний характер і не забезпечують комплексного підходу до вирішення екологічних питань та врахування довгострокових ризиків. Це обмежує можливості впровадження

© Спрягайло О.А., Спрягайло О.В., Лавріненко К.В., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

принципів сталого розвитку на місцевому рівні. Таким чином, існує потреба у комплексному дослідженні особливостей інтеграції екологічної складової у стратегії розвитку територіальних громад.

Актуальність дослідження. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю системного врахування екологічних питань у процесах управління територіальним розвитком в умовах зростання глобальних екологічних викликів, зокрема зміни клімату, деградації природних ресурсів та підвищення антропогенного навантаження [4, 5].

У контексті децентралізації в Україні територіальні громади відіграють ключову роль у формуванні та реалізації політики сталого розвитку [3, 6, 7]. Саме на цьому рівні приймаються управлінські рішення, що безпосередньо впливають на стан довкілля, якість життя населення та ефективність використання природних ресурсів. За таких умов стратегічне планування розвитку територіальних громад набуває особливої ваги як інструмент інтеграції екологічних, економічних та соціальних пріоритетів [8, 9]. Водночас ефективність стратегічного планування значною мірою залежить від того, наскільки повно і системно екологічна складова враховується у відповідних документах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання децентралізації влади в Україні розглядається як одна з ключових реформ, що супроводжується передачею значної частини повноважень на місцевий рівень та трансформацією системи управління територіальним розвитком [2, 10]. У цих умовах територіальні громади відіграють провідну роль у формуванні та реалізації політики сталого розвитку, що зумовлює підвищення значущості стратегічного планування як інструменту управління розвитком територій [3, 6, 7, 11, 12].

У науковій літературі сформовано значний масив досліджень, присвячених теоретичним і прикладним аспектам стратегічного планування розвитку територіальних громад. У цих роботах розглядаються підходи до формування стратегій, їх роль у забезпеченні конкурентоспроможності громад, а також механізми узгодження довгострокових пріоритетів розвитку громад [13-16]. Окремі дослідження акцентують увагу на врахуванні специфіки функціонування громад та умов їх розвитку [12, 17].

Поряд із цим, значна кількість праць присвячена аналізу практики розроблення стратегій розвитку територіальних громад, включаючи оцінку їх змісту, структури та відповідності нормативно-правовим вимогам. У межах цих досліджень застосовуються методи контент-аналізу, порівняльного аналізу та оцінювання кількісних параметрів стратегічних документів, що дозволяє виявити особливості їх формування та реалізації [12, 18, 19].

Окремий напрям досліджень пов'язаний із обґрунтуванням ролі стратегічного планування у забезпеченні сталого розвитку територіальних громад. Воно розглядається як інструмент узгодження економічних, соціальних та екологічних процесів, що забезпечує балансування інтересів розвитку та ефективне використання ресурсного потенціалу територій [1, 3]. При цьому концепція сталого розвитку визначається як базова парадигма сучасної державної політики, яка передбачає необхідність досягнення балансу між соціально-економічним розвитком і збереженням довкілля [8, 13].

У цьому контексті важливим є врахування екологічної складової у процесі стратегічного планування. Зокрема, наголошується на необхідності інтеграції екологічних аспектів на всіх етапах розроблення стратегій розвитку територіальних громад, починаючи з комплексного аналізу їх стану та завершуючи формуванням стратегічних і оперативних цілей [9]. Також підкреслюється, що ефективні стратегії мають передбачати узгодження економічних, соціальних та екологічних цілей і конкретизацію екологічних завдань у відповідних планах дій [20].

Водночас аналіз наукових джерел свідчить, що екологічна складова у стратегічному плануванні територіальних громад здебільшого не виступає предметом самостійних досліджень, а розглядається опосередковано, у контексті інших напрямів розвитку [21].

У міжнародному науковому дискурсі увага здебільшого зосереджується на ролі місцевих органів влади у досягненні Цілей сталого розвитку, а також значенні партнерств і багаторівневого управління у вирішенні екологічних проблем [22-26].

Разом з тим, окремі дослідження вказують на обмеженість практичної реалізації принципів сталого розвитку на місцевому рівні, що пов'язано з недостатньою узгодженістю управлінських рішень, обмеженими ресурсами та відсутністю комплексного підходу до вирішення екологічних проблем. Зокрема, підкреслюється, що впровадження екологічно орієнтованого управління в громадах часто має фрагментарний характер і залежить від пріоритетів місцевої влади [12, 26].

Таким чином, аналіз наукових публікацій свідчить, що дослідження у сфері стратегічного планування територіальних громад здебільшого зосереджені на загальних питаннях або окремих аспектах сталого розвитку. Водночас екологічна складова стратегій розвитку громад розглядається переважно фрагментарно та не виступає предметом цілісного наукового аналізу.

Невирішена раніше частина загальної проблеми. Попри значний науковий доробок у сфері стратегічного планування територіальних громад, невирішеною залишається проблема комплексного оцінювання інтеграції екологічної складової у стратегії їх розвитку. Зокрема, недостатньо розробленими є підходи до визначення її місця і ролі у системі стратегічних цілей, оцінювання рівня інтеграції в оперативні механізми реаліза-

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

ції, а також узгодженості між стратегічним і оперативним рівнями планування. Водночас потребує подальшого дослідження виявлення системних прогалин і факторів, що обмежують ефективність інтеграції екологічної складової у стратегічне планування на місцевому рівні.

Новизна. Наукова новизна одержаних результатів полягає у комплексному підході до оцінки інтеграції екологічної складової у стратегії розвитку територіальних громад. Уперше запропоновано типологію позиціонування екологічної складової у стратегічних цілях громад, що дозволяє визначити її роль і функціональне призначення у системі стратегічного планування. Удосконалено підходи до аналізу інтеграції екологічної складової шляхом одночасного врахування стратегічного та оперативного рівнів планування, що дало змогу виявити неузгодженості між ними. Набуло подальшого розвитку обґрунтування системних прогалин і проблем інтеграції екологічної складової у стратегічне планування територіальних громад

Методологічне та загальнонаукове значення. Методологічне значення дослідження полягає у розробленні підходу до комплексного аналізу інтеграції екологічної складової у стратегії розвитку територіальних громад, який передбачає одночасне врахування стратегічного та оперативного рівнів планування, а також оцінку їх узгодженості. Запропонована типологія позиціонування екологічної складової може бути використана як аналітичний інструмент для дослідження стратегічних документів та оцінки рівня інтеграції екологічних пріоритетів.

Загальнонаукове значення отриманих результатів полягає у поглибленні теоретичних уявлень про роль екологічної складової у системі стратегічного планування територіального розвитку та уточненні підходів до її інтеграції в контексті забезпечення сталого розвитку на місцевому рівні

Матеріали і методи. Матеріалами дослідження слугували стратегії розвитку 55 територіальних громад Черкаської області, які перебувають у відкритому доступі. Вибірка охоплює стратегії міських, селищних та сільських громад, що забезпечує репрезентативність дослідження для регіонального рівня. Додатково використано результати комунікації з розробниками стратегічних документів у громадах, що дозволило уточнити особливості їх підготовки та практичного застосування.

Методологічну основу дослідження становлять загальнонаукові та спеціальні методи. Зокрема, застосовано метод аналізу та узагальнення (для визначення особливостей інтеграції екологічної складової у стратегічні документи), контент-аналіз (для дослідження змісту стратегічних і оперативних цілей), порівняльний метод (для виявлення відмінностей між стратегіями різних громад), метод типологізації (для виокремлення моделей позиціонування екологічної складової), а також системний підхід (для оцінки узгодженості між різними рівнями стратегічного планування).

Виклад основного матеріалу.

1. Загальна характеристика стратегій розвитку громад

Проаналізовані стратегічні документи були розроблені у період 2017-2024 рр., що дозволяє оцінити підходи до стратегічного планування громад у динаміці та в контексті сучасних трансформацій системи місцевого самоврядування в Україні.

Аналіз термінів дії стратегій показав їхню суттєву варіативність. Станом на момент дослідження (червень-липень 2025 р.) частина громад уже втратила актуальність цих стратегічних документів: у 10,9% громад термін дії стратегій завершився у 2024 році, ще у 16,4% громад – у 2025 році, при цьому оновлені версії у відкритому доступі переважно відсутні. Водночас значна частина громад має більш довгострокові документи: 23,6% стратегій чинні до 2027 року, 36,4% – до 2028 року, 16,4% – до 2030-2032 років. Таким чином, виявлено потенційні прогалини у своєчасному оновленні стратегічних документів та забезпеченні їх публічності.

Водночас встановлено, що у частині громад стратегії розвитку характеризуються низьким рівнем змістового наповнення, що може свідчити про їх формальний характер та використання переважно як інструменту виконання законодавчих вимог або залучення фінансування. Зокрема, спостерігаються декларативність формулювання цілей, відсутність чітких механізмів реалізації та значна подібність змісту стратегій різних громад.

2. Позиціонування екологічної складової у стратегічних цілях

Ключові напрями розвитку територіальних громад та відображення пріоритетів місцевої політики визначають стратегічні цілі, тому саме через їх формулювання доцільно оцінювати роль екологічної складової у системі стратегічного планування.

Проведений аналіз показав, що екологічна складова присутня в усіх досліджених стратегіях, однак її позиціонування суттєво відрізняється: у більшості випадків вона інтегрується в інші стратегічні напрями і не виступає самостійним пріоритетом розвитку громад. При цьому вона може бути представлена одночасно в кількох стратегічних цілях. Так, лише у 21,8% випадків екологічна складова чітко виокремлена у стратегічних цілях. У 67,3% вона інтегрована у напрями, пов’язані з якістю життя, безпекою та розвитком інфраструктури; у 18,2% – пов’язується з економічним розвитком та інвестиційною привабливістю; у 9,1% – з розвитком системи управління територіальною громадою та людського капіталу (рис. 1).

У результаті узагальнення виявлених підходів до інтеграції екологічної складової у стратегічні цілі громад виокремлено такі типи її позиціонування:



Рис. 1. Розподіл варіантів позиціонування екологічної складової у стратегічних цілях територіальних громад, %

Примітка. Категорії не є взаємовиключними: одна громада може бути віднесена до кількох груп одночасно

Тип 1. *Екологічна складова як самостійний пріоритет* – представлена окремими стратегічними цілями («екологічна безпека», «довкілля» тощо).

Тип 2. *Екологічна складова як компонент якості життя* – включена у стратегічні цілі, пов'язані з «комфортним середовищем», «безпекою», «інфраструктурою».

Тип 3. *Екологічна складова як економічний інструмент* – інтегрована у стратегічні цілі, спрямовані на енергоефективність, розвиток відновлюваних джерел енергії та залучення інвестицій.

Тип 4. *Екологічна складова як управлінський компонент* – відображена у стратегічних цілях, спрямованих на розвиток управлінських спроможностей громади та людського капіталу.

Таким чином, екологічна складова у стратегічних цілях громад здебільшого має допоміжний характер і не розглядається як ключовий фактор розвитку. Переважання інтеграційної моделі через компоненти якості життя свідчить про її сприйняття переважно як інструменту забезпечення комфортних умов проживання, а не як самостійної цінності і базового елементу сталого розвитку, що обмежує потенціал впровадження його принципів на місцевому рівні. Водночас інтеграція екологічної складової у різні напрями розвитку є позитивною практикою, однак у досліджених стратегіях вона часто має фрагментарний характер і не забезпечує комплексного підходу.

3. Відображення екологічних пріоритетів у оперативних цілях

Для оцінки рівня інтеграції екологічної складової у реальні управлінські рішення було проаналізовано оперативні цілі стратегій розвитку громад. Саме вони конкретизують шляхи реалізації стратегічних пріоритетів і відображають практичні напрями діяльності.

Проведений аналіз показав, що екологічні пріоритети представлені в оперативних цілях більшості громад, однак їх зміст і рівень деталізації суттєво відрізняються. Загалом можна виокремити кілька основних напрямів екологічного спрямування, що знаходять відображення в оперативних цілях громад.

Найпоширенішими є цілі, пов'язані із забезпеченням екологічної безпеки та покращенням стану довкілля (61,8% громад). Водночас, попри їх домінування, у більшості випадків вони формулюються узагальнено та декларативно, без чіткого визначення механізмів реалізації та очікуваних результатів. Значна частина громад (36,4%) визначає пріоритетами енергозбереження, енергетичну трансформацію та розвиток відновлюваної енергетики. Менш поширеними є напрями, пов'язані з розвитком інфраструктури та благоустроєм (20%), управлінням твердими побутовими відходами (18,2%) і покращенням якості води та водних ресурсів (14,5%). Водночас напрями, пов'язані зі збереженням природно-ресурсного потенціалу, біорізноманіття та розвитком природно-заповідного фонду, представлені лише у 9,1% громад, а екологічна освіта та виховання — у 5,5% (рис. 2).

Загалом отримані результати свідчать про переважання напрямів, орієнтованих на вирішення базових комунальних та інфраструктурних проблем, тоді як більш складні та системні екологічні напрями, пов'язані з довгостроковими екологічними викликами, залишаються недостатньо представленими.

4. Проблеми реалізації екологічної складової

Аналіз показав значну варіативність у підходах до формування завдань, спрямованих на досягнення оперативних цілей, а також невідповідність між їх формулюванням і змістом передбачених дій. Зокрема, однакові за змістом оперативні цілі в різних громадах наповнюються різним набором заходів, що свідчить про відсутність усталених підходів до їх практичної реалізації.

У частині випадків завдання не забезпечують досягнення заявлених цілей або охоплюють лише

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



Рис. 2. Розподіл основних напрямів екологічної складової в оперативних цілях територіальних громад, %

Примітка. Категорії не є взаємовиключними: одна громада може бути віднесена до кількох груп одночасно

окремі аспекти екологічної політики. Наприклад, в окремих громадах оперативна ціль щодо покращення стану довкілля обмежується 1–2 завданнями, що не дозволяє забезпечити комплексний підхід до вирішення екологічних проблем. Як правило, такі заходи зосереджені на питаннях поводження з відходами, благоустрою чи водопостачання, тоді як інші важливі компоненти залишаються поза увагою.

Окремою проблемою є недостатня конкретизація заходів у сфері охорони природних територій. Показовим є випадок, коли на території громади розташований цінний природний об'єкт, що приваблює значну кількість туристів і має потенціал формувати вагому частину місцевого бюджету. Водночас екологічна складова відповідної стратегії обмежується лише двома завданнями, що не забезпечує комплексного підходу до його належної охорони та збереження.

Таким чином, виявлені особливості свідчать про те, що реалізація екологічної складової має фрагментарний характер і здійснюється переважно через окремі, слабо пов'язані між собою заходи, що не забезпечує цілісності управлінського впливу у сфері охорони довкілля.

5. Узгодженість стратегічного та оперативного рівнів

Ефективність стратегічного планування значною мірою залежить від узгодженості між стратегічними та оперативними цілями, оскільки саме оперативні цілі забезпечують практичну реалізацію визначених пріоритетів розвитку громади.

Результати аналізу свідчать, що у значній частині громад така узгодженість є недостатньою. Зокрема, простежується невідповідність між формулюванням стратегічних цілей та їх конкретизацією на рівні оперативних цілей: екологічні пріоритети, задекларовані на стратегічному рівні, не завжди отримують належне відображення або деталізацію у подальшому плануванні.

Встановлено також, що однакові або подібні за змістом оперативні цілі в різних громадах наповнюються різними за змістом завданнями, що свідчить про відсутність уніфікованих підходів до їх формування. У результаті стратегічні цілі не завжди мають чітку операціоналізацію, а передбачені заходи не забезпечують їх досягнення в повному обсязі.

Окремою проблемою є дублювання або нечітке розмежування стратегічних і оперативних цілей. У деяких стратегіях подібні за змістом формулювання використовуються як для стратегічних, так і для оперативних цілей, що ускладнює ієрархію планування та знижує його внутрішню узгодженість.

У результаті відсутність належної координації між рівнями планування ускладнює формування послідовної системи цілей і обмежує можливості ефективної реалізації екологічних пріоритетів у межах стратегічних документів.

6. Ключові прогалини екологічної складової

Узагальнення результатів проведеного аналізу дозволило виокремити прогалини у змістовному наповненні екологічної складової стратегій розвитку територіальних громад. Попри формальну наявність екологічних цілей і завдань, вони часто мають вибірковий характер і не охоплюють повний спектр напрямів, необхідних для забезпечення сталого розвитку.

Найбільш суттєвими є прогалини у представленні напрямів, пов'язаних із довгостроковими екологічними викликами та збереженням природного потенціалу територій. Відповідні аспекти або не

відображені у стратегічних документах, або подані узагальнено, без належної змістовної деталізації.

Крім того, екологічна складова у стратегічному плануванні громад не формується як цілісна система, а реалізується через окремі, слабо пов'язані між собою напрями. Це обмежує можливості комплексного врахування екологічних аспектів і знижує ефективність впровадження принципів сталого розвитку на місцевому рівні.

Зазначені особливості вказують на наявність суттєвих змістових прогалин в екологічній складовій стратегій розвитку громад, що потребують подальшого осмислення та вдосконалення.

7. Системні проблеми інтеграції екологічної складової

Узагальнення результатів аналізу стратегій розвитку громад, а також комунікація з розробниками цих документів дозволили виокремити ключові проблеми, що впливають на рівень інтеграції екологічної складової у стратегічне планування.

Встановлено, що однією з основних проблем є формальний підхід до розробки стратегій, коли вони розглядаються переважно як вимога законодавства або інструмент залучення фінансування, що зумовлює винятково декларативний характер цілей і завдань.

Суттєвим обмеженням є недостатній рівень фаховості розробників стратегій та дефіцит експертних знань у сфері стратегічного планування й екології, що проявляється у спрощеному або некоректному трактуванні екологічних питань, відсутності чітких орієнтирів їх досягнення та обмеженому розумінні взаємозв'язків між різними рівнями планування.

Важливим чинником є також обмеженість ресурсного забезпечення та інформаційної бази. Зокрема, відсутність системного екологічного моніторингу й аналітичних даних ускладнює обґрунтування управлінських рішень і звужує можливості врахування екологічних факторів у стратегічних документах.

Крім того, на формування змісту стратегій впливає недостатнє залучення зацікавлених сторін і експертного середовища, що обмежує врахування складних і довгострокових екологічних викликів.

Додатково простежується орієнтація на формування «безконфліктних» пріоритетів, що сприяє уникненню складних екологічних проблем і зумовлює їх другорядність у системі цілей розвитку громад.

У сукупності зазначені фактори визначають модель стратегічного планування, за якої екологічна складова не інтегрується як повноцінний і системний елемент розвитку, що обмежує можливості реалізації екологічно орієнтованої політики на місцевому рівні.

Головні висновки. Отримані результати свідчать, що екологічна складова у стратегічному плануванні територіальних громад здебільшого інтегрується в інші напрями розвитку, переважно пов'язані з якістю життя, інфраструктурою та безпекою. Такий підхід загалом відповідає принципам сталого розвитку, однак у більшості випадків не забезпечує достатнього рівня системності, що зумовлює її допоміжний характер.

Запропонована типологія підтверджує переважання інтеграційних підходів та інструментальне трактування екологічної складової, що визначає і зміст оперативних цілей, орієнтованих переважно на вирішення прикладних комунальних завдань. Водночас системні напрями, зокрема збереження біорізноманіття, розвиток природно-заповідного фонду, адаптація до змін клімату та екологічний моніторинг, залишаються недостатньо представленими.

Виявлена неузгодженість між стратегічними та оперативними цілями свідчить про відсутність цілісної логіки планування, що знижує ефективність реалізації екологічної політики на місцевому рівні. У цілому екологічна складова має фрагментарний характер і не охоплює ключові напрями, необхідні для забезпечення сталого розвитку.

Зазначені особливості зумовлені системними проблемами, зокрема формальним підходом до стратегічного планування, недостатнім рівнем фаховості, обмеженістю ресурсів і даних, а також недостатнім залученням експертного середовища.

Підвищення ефективності інтеграції екологічної складової потребує переходу до системного підходу, який передбачає посилення її ролі у структурі стратегічних цілей, узгодження рівнів планування та розширення змісту екологічних завдань.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати можуть бути використані органами місцевого самоврядування при розробленні та оновленні стратегій розвитку територіальних громад з метою підвищення рівня інтеграції екологічної складової. Вони також можуть слугувати основою для удосконалення методичних підходів до стратегічного планування та подальших наукових досліджень у сфері сталого розвитку на місцевому рівні.

Література

1. Дерій Ж., Грицку Ю., Стецик Я. Стратегія розвитку територіальних громад в умовах сучасних соціально-економічних викликів. *Проблеми і перспективи економіки та управління*. 2025. Вип. 3 (43). С. 150-160. https://doi.org/10.25140/2411-5215-2025-3(43)-150-160
2. Опанасюк Ю. А., Деміхов О. І., Таранюк Л. М., Таранюк К. В., Дегтярьов В. А. Особливості розроблення стратегії розвитку територіальної громади в сучасних умовах. *Державне управління: удосконалення та розвиток*. 2024. № 5. DOI: https://doi.org/10.32702/2307-2156.2024.5.6

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

3. Хохуляк О. Роль стратегічного планування в системі забезпечення сталого розвитку територіальних громад. *Науковий вісник Полісся*. 2022. № 2. С. 124-136. DOI: https://doi.org/10.25140/2410-9576-2022-2(25)-124-136
4. Liu Y., Yang R., Sun M., Zhang L., Li X., Meng L., Liu Q. Regional sustainable development strategy based on the coordination between ecology and economy: A case study of Sichuan Province, China. *Ecological Indicators*. 2022. Vol. 134. 108445. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108445
5. Smith H., Discetti R., Bellucci M., Acuti D. SMEs engagement with the Sustainable Development Goals: A power perspective. *Journal of Business Research*. 2022. Vol. 149. P. 112-122. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2022.05.021
6. Бліщук К. М. Сталий розвиток територіальних громад в контексті децентралізаційних змін. *Економічний простір.* 2024. № 190. С. 104-107. DOI: https://doi.org/10.32782/2224-6282/190-19
7. Гасій О. В., Луцишін О. Ю., Кашкалда В. В. Теоретичні засади сталого розвитку в контексті управління на муніципальному рівні. *Ефективна економіка*. 2024. № 6. DOI: http://doi.org/10.32702/2307-2105.2024.6.43
8. Лазарева А. О., Кулініч Т. В., Боднарук О. В. Проблематика розробки стратегії діяльності територіальних громад у контексті сталого розвитку. *Економіка та держава*. 2021. № 4. С. 99-104. DOI: https://doi.org/10.32702/2306-6806.2021.4.99
9. Хижнякова Н. О. Відображення екологічних аспектів у стратегії розвитку територіальної громади. *Економічний форум*. 2018. № 1. С. 106-111.
10. Круглашов А., Бурега В. Здобутки і труднощі в реалізації децентралізації влади в Україні. *Аспекти публічного управління*. 2021. Вип. 9(2). С. 68-76. DOI: https://doi.org/10.15421/152120
11. Кулик Т. П. Підходи та методи розробки стратегії місцевого розвитку. *Освіта і наука*. 2019. Вип. 1 (26). С. 213-218. DOI: https://doi.org/10.31339/2617-0833-2019-1(26)-213-218
12. Сологуб С. І. Оцінка стану розробки стратегій соціально-економічного розвитку ОТГ. *Актуальні проблеми розвитку економіки регіону*. 2022. Вип. 2 (18). С. 46-56. DOI: https://doi.org/10.15330/apred.2.18.46-56
13. Корольков В. В., Тельчаров Е. А. Концептуальні основи стратегічного планування розвитку об'єднаних територіальних громад: теоретико-методологічний аналіз та практичні імплікації. *Економічний простір*. 2025. № 203. С. 121-127. DOI: https://doi.org/10.30838/EP.203.121-127
14. Лозинська Т. Стратегічне планування в громадах: теоретичне підгрунтя. *Наукові праці МАУП. Політичні науки та публічне управління*. 2025. Вип. 2 (78). С. 95-102. DOI: https://doi.org/10.32689/2523-4625-2025-2(78)-14
15. Манець С. В. Система багаторівневого стратегічного планування як елемент модернізації управління регіональним розвитком. *Молодий вчений*. 2025. № 2 (133). С. 130-136. DOI: https://doi.org/10.32839/2304-5809/2025-2-133-10
16. Окуньовська Ю. В. Особливості планування розвитку деокупованих територіальних громад. *Політичне життя*. 2025. Вип. 4. С. 32-38. DOI https://doi.org/10.31558/2519-2949.2025.4.5
17. Івасюк І. Стратегічне планування розвитку територіальних громад гірських населених пунктів Карпатського регіону в умовах європейської інтеграції України. *Грані.* 2024. Том 27. № 6. С. 6-13. DOI: https://doi.org/10.15421/1724106
18. Бурик М. М., Джегур Г. В. Стратегія розвитку територіальної громади: позитивні приклади формування і реалізації. *Публічне урядування*. 2024. №2 (39). С. 6-16. DOI: https://doi.org/10.32689/2617-2224-2024-2(39)-1
19. Міхно П., Крисанова Ю., Козарь В. Застосування SWOT-аналізу у стратегічному плануванні розвитку Олександрійської територіальної громади. *Просторовий розвиток*. 2024. №10. С. 507-518. DOI: https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.10.507-518
20. Васильченко Г., Парасюк І., Єременко Н. Планування розвитку територіальних громад. Навчальний посібник для посадових осіб місцевого самоврядування. Київ: ТОВ «ПІДПРИЄМСТВО «ВІ ЕН ЕЙ», 2015. 256 с.
21. Керецман Н. І., Пітюлич М. М., Попадинець Н. М. Стратегічні пріоритети соціально-економічного розвитку територіальних громад регіону. *Регіональна економіка*. 2023. №3. С. 28-39. DOI: https://doi.org/10.36818/1562-0905-2023-3-3
22. Bisogno M., Cuadrado-Ballesteros B., Rossi F. M., Peña-Miguel N. Sustainable development goals in public administrations: Enabling conditions in local governments. *International Review of Administrative Sciences*. 2023. Vol. 89. №. 4. P. 1223-1242. DOI: https://doi.org/10.1177/00208523221146458
23. Leach M., Mearns R., Scoones I. Community-based sustainable development: consensus or conflict? *IDS Bulletin*. 2025. Vol. 56. №. 1A. DOI: https://doi.org/10.19088/1968-2025.104
24. Leal Filho W., Dibbern T., Dinis M. A. P., Cristofoletti E. C., Mbah M. F., Mishra A., Aina Y. A. The added value of partnerships in implementing the UN sustainable development goals. *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 438. 140794. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140794
25. Masuda H., Kawakubo S., Okitasari M., Morita K. Exploring the role of local governments as intermediaries to facilitate partnerships for the Sustainable Development Goals. *Sustainable Cities and Society*. 2022. Vol. 82. 103883. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103883
26. Грузд М. В. Співпраця організацій громадянського суспільства з об'єднаними територіальними громадами щодо розвитку територій. *Розвиток партнерства ЄС – Україна в публічному управлінні: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*, м. Харків, 25 листопада 2022 року. Харків: ТОВ «Константа», 2022. С. 333-337.

Дата першого надходження статті до видання: 28.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 633.11:581.1:58.056:58.084
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.43

СПОСІБ ДОБОРУ ПОСУХОСТІЙКОГО СЕЛЕКЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ ПШЕНИЦІ ЯРОЇ

Юрченко Т.В., Пикало С.В., Пірич А.В., Олефіренко Б.А.
Миронівський інститут пшениці імені В.М. Ремесла
Національної академії аграрних наук України
08853, с. Центральне, Київська обл.
pykserg@ukr.net

Пшениця належить до провідних продовольчих культур як в Україні, так і у світі. У сучасних умовах особливого значення набуває селекція нових сортів цієї культури, що поєднують комплекс господарсько цінних ознак. Одним із ключових завдань генетики, селекції та біотехнології є виявлення та добір генотипів, здатних протистояти несприятливому впливу факторів навколишнього середовища. Важливою складовою адаптивного потенціалу пшениці є її посухостійкість. Для оцінювання реакції рослин на дефіцит вологи застосовують численні методи, що базуються на різних принципах дії. Проте значна частина наявних підходів не повною мірою відповідає сучасним вимогам, тому актуальним залишається розроблення нових і вдосконалення існуючих методів оцінювання та добору посухостійких генотипів пшениці. У представленій роботі наведено порівняльну характеристику різних методів, кожен з яких має свої переваги та недоліки. Розроблено спосіб добору посухостійкого селекційного матеріалу пшениці ярої, який базується на дії штучно змодельованого стресового чинника, спрямованого проти виживання стрес-чутливих форм. Запропонований спосіб охороняється патентом на корисну модель. Новим є те, що добір генотипів проводять за життєздатними проростками після культивування насіння на високоосмотичному розчині сахарози концентрацією 0,9 М у термостаті за температури 21 °С терміном 7 діб. Суть методу полягає в тому, що він дає можливість значно спростити та прискорити добір посухостійких форм і таким чином забезпечує скорочення селекційного процесу та зменшує матеріальні затрати на його виконання. Переваги запропонованого методу над традиційними полягають у можливості працювати з великими вибірками зразків та можливості контролювати умови зовнішнього середовища. Використання даного методу в селекції пшениці ярої сприятиме створенню нових сортів, які мають цінні практичні властивості. Запропонований підхід дає змогу більш повно розкрити продуктивний потенціал досліджуваних сортів, закладений у процесі селекції. Це, своєю чергою, підвищить ефективність їх практичного застосування як у виробництві рослинницької продукції, так і в подальшій селекційній роботі. *Ключові слова:* пшениця, спосіб, стійкість, посуха, добір, насіння

Method for selecting drought-resistant breeding material of spring wheat. Yurchenko T., Pykalo S., Pirych A., Olefirenko B.
Wheat is one of the leading food crops both in Ukraine and worldwide. Under current conditions, the breeding of new wheat varieties combining a complex of economically valuable traits is of particular importance. One of the key objectives of genetics, breeding, and biotechnology is the identification and selection of genotypes capable of withstanding adverse environmental factors. Drought resistance is an important component of wheat adaptive potential. Numerous methods based on different principles are used to evaluate plant responses to moisture deficiency. However, a significant proportion of existing approaches do not fully meet modern requirements; therefore, the development of new methods and improvement of existing approaches for the evaluation and selection of drought-resistant wheat genotypes remains relevant. The present study provides a comparative analysis of different methods, each characterized by specific advantages and limitations. A method for selecting drought-resistant breeding material of spring wheat has been developed, based on the action of an artificially simulated stress factor directed against the survival of stress-sensitive forms. The proposed method is protected by a utility model patent. The novelty of the method lies in the selection of genotypes according to viable seedlings after seed cultivation in a high-osmotic sucrose solution at a concentration of 0.9 M in a thermostat at 21 °C for 7 days. The essence of the method is that it significantly simplifies and accelerates the selection of drought-resistant forms, thereby shortening the breeding process and reducing material costs. The advantages of the proposed method over traditional approaches include the possibility of working with large sample sets and controlling environmental conditions. The application of this method in spring wheat breeding will facilitate the development of new varieties possessing valuable practical traits. The proposed approach enables a more complete realization of the productivity potential incorporated into the studied varieties during the breeding process. This, in turn, will improve the efficiency of their practical application both in crop production and in further breeding programs. *Key words:* wheat, method, resistance, drought, selection, seeds

Постановка проблеми. Пшениця належить до найважливіших продовольчих культур світового значення [1; 2]. До початку повномасштабної війни в Україні площі її вирощування сягали 6–7 млн га, тоді як у 2025 році посіви цієї культури ледь перевищували 5 млн га [3]. Сучасні кліматичні зміни, що спостерігаються протягом останніх десятиліть, суттєво впливають на агроекологічні умови вирощування пшениці. Зокрема, відзначається зростання частоти та сили посух, температурних аномалій і нерівномірності розподілу атмосферних опадів [4; 5]. Такі чинники обмежують реалізацію продуктивного потенціалу рослин, спричиняють коливання врожайності, зменшення валового збору зерна та

© Юрченко Т.В., Пикало С.В., Пірич А.В., Олефіренко Б.А., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

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

погіршення його якісних показників, що може становити загрозу продовольчій стабільності [6]. За таких умов особливого значення набуває пошук і залучення до селекційного процесу генотипів пшениці, які характеризуються високою адаптивністю та стійкістю до дії абіотичних стресорів.

Актуальність дослідження. Одним із найвагоміших природних факторів, що негативно позначаються на фізіологічних процесах росту й розвитку рослин пшениці, є нестача вологи, зумовлена посушливими умовами [7; 8]. Впродовж останніх років в Україні дедалі частіше спостерігаються інтенсивні посухи саме в період активної вегетації, коли рослини найбільш чутливі до водного стресу. Дефіцит вологи в цей час призводить до пригнічення ростових процесів, зменшення площі листкової поверхні, скорочення розмірів стебел і генеративних органів, що зрештою негативно впливає на продуктивність рослин та рівень урожайності [9]. У зв'язку з цим одним із ключових завдань селекції пшениці є створення сортів, адаптованих до умов водного дефіциту. Виведення та впровадження у виробництво нових сортів потребує безперервного вдосконалення існуючих і розроблення нових методів добору, спрямованих на підвищення продуктивного та адаптивного потенціалу рослин [10]. Оскільки кліматичні умови, властивості ґрунтів і рівень адаптивності сортів постійно змінюються, дослідження, пов'язані зі створенням і оптимізацією методів оцінювання та добору посухостійких зразків, залишаються актуальними впродовж тривалого часу.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Представлені матеріали є частиною таких науково-дослідних робіт: «Особливості формування ознак і властивостей зернових культур, які визначають стійкість до абіотичних стресових чинників, в умовах Лісостепу України з використанням біотехнологічних та фізіолого-генетичних методів» (номер державної реєстрації № 0121U100435).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розробка та вдосконалення методів добору посухостійких форм є важливою складовою селекційного процесу зернових культур. Оцінювання реакції насіння пшениці на осмотичний стрес на ранніх етапах органогенезу є інформативним підходом для характеристики адаптивного потенціалу сортів [11]. В якості стресових агентів для оцінки посухостійкості найчастіше використовують поліетиленгліколь, сахарозу та маніт. Н. І. Прокопік та ін. для створення осмотичного стресу використовували сахарозу, маніт та сорбіт різних молярних концентрацій, що відповідали 16 і 18 атм осмотичного тиску [12]. Встановлено, що поряд із дисахаридом сахарозою шестиатомні аліфатичні спирти маніт і сорбіт виявили ідентичну спроможність до створення водного дефіциту. І. В. Гаврилюк та Г. М. Ковалишина [13] досліджували вплив стресу від посухи, індукованого манітом, на проростання насіння різних сортів пшениці м'якої озимої. Автори дійшли висновку, що доцільно проводити відбір сортів на 10-й день спостережень, коли варіація між варіантами спостережень є найменшою.

А. М. Салій і Н. І. Рябчун [14] визначили рівень посухостійкості сортів пшениці м'якої озимої шляхом пророщування насіння в осмотичних розчинах ПЕГ 6000 (14 % і 16 %) та встановили тісний кореляційний зв'язок між кількістю пророслого насіння за обох концентрацій і втратами вологи в генеративний період (r = 0,73), що підтверджує прогностичну цінність цього підходу для оцінки посухостійкості.

Подібні закономірності індивідуальної сортової реакції на осмотичний стрес виявлено і в дослідженнях В. Варавкіна та Н. Таран [15], які вивчали осморегуляторні властивості насіння пшениці озимої в умовах концентрованих розчинів сахарози. Автори показали, що за підвищеного осмотичного тиску спостерігається різна інтенсивність лінійного росту коренів залежно від сорту, тоді як пригнічення росту пагонів посилюється зі зростанням концентрації сахарози в діапазоні 14–22 атм у всіх досліджуваних генотипів. Це свідчить про високу чутливість надземної частини проростків до осмотичного стресу та водночас про значну роль кореневої системи у формуванні адаптивної відповіді.

M. Almansouri et al. [16] показали, що помірні рівні осмотичного стресу, спричиненого NaCl, манітолом і ПЕГ, зумовлюють лише затримку проростання пшениці твердої, тоді як високі концентрації NaCl і ПЕГ істотно знижують кінцевий відсоток проростання. При цьому гальмування проростання не було пов'язане з порушенням мобілізації запасних речовин, а основний ефект ПЕГ реалізовувався через обмеження водопоглинання, тоді як негативний вплив NaCl автори пов'язують із довготривалою дією накопичених токсичних іонів.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Варто підкреслити, що методологічне забезпечення всебічного дослідження біологічної та агрономічної посухостійкості рослин пшениці є пріоритетним завданням багатьох селекційних установ України. Для скринінгу сортозразків пшениці на посухостійкість є багато методів, заснованих на різних принципах дії, і кожен із них має свої переваги і недоліки. Для прискорення селекційного процесу й отримання достовірних результатів необхідно застосовувати різні методики дослідження зразків за конкретними ознаками стійкості до стресу. Одним із підходів до оцінювання посухостійкості зернових культур є проведення польових досліджень [17]. Для ідентифікації стійких до посухи форм у природних умовах запропоновано низку критеріїв, які базуються на порівнянні врожайності зерна за оптимального вологозабезпечення та в умовах водного дефіциту, що дає змогу оцінити рівень толерантності або чут-

ливості генотипів до стресу [18]. Показником посухостійкості при цьому вважають ступінь зниження продуктивності рослин за екстремальних умов вирощування відносно контрольних. Водночас польова оцінка характеризується значною трудомісткістю, потребує тривалого часу та залежить від наявності відповідних погодних умов, необхідних для повноцінного прояву досліджуваної ознаки. Крім того, такі дослідження супроводжуються суттєвими матеріальними витратами.

Вегетаційні методи ґрунтуються на вирощуванні рослин у спеціалізованих приміщеннях із регульованими параметрами середовища. У цьому випадку основним критерієм оцінювання є рівень урожайності рослин за стресових умов порівняно з контролем [19]. Аналіз відмінностей між дослідними та контрольними варіантами дає змогу визначити ступінь стійкості генотипів до дефіциту вологи. Проте такі методи також характеризуються високою трудомісткістю, значними обсягами робіт і низькою пропускною здатністю, що ускладнює їх використання для масового добору селекційного матеріалу.

Перспективним напрямом є добір посухостійких форм на основі аналізу життєздатності рослин в умовах штучно створеного стресу. Особливу цінність мають методи ранньої діагностики, що проводяться на стадії проростків, оскільки вони дозволяють здійснювати дослідження незалежно від сезону та охоплювати великі обсяги селекційного матеріалу [15]. Застосування таких підходів дає можливість оцінити відносну посухостійкість рослин уже на ранніх етапах органогенезу.

Мета роботи – розробити спосіб, який дозволить зручно, швидко і максимально ефективно оцінити та відібрати посухостійкі сортозразки пшениці ярої, що в кінцевому рахунку дасть змогу прискорити селекційний процес і зменшити трудовитрати.

Новизна. Розроблено спосіб добору посухостійкого селекційного матеріалу пшениці ярої, що обумовлений токсичною дією стресового чинника, спрямованого проти виживання нестійких форм. Запропонований спосіб охороняється патентом на корисну модель [20]. Суть методу полягає в тому, що він проводиться в лабораторних умовах і дає змогу значно прискорити та спростити відбір посухостійких зразків. Новим є те, що добір генотипів проводять за життєздатними проростками після культивування насіння на високоосмотичному розчині сахарози концентрацією 0,9 М у термостаті за температури 21 °С терміном 7 діб.

Методологічне або загальнонаукове значення. Запропонований спосіб добору посухостійкого селекційного матеріалу пшениці ярої доповнить методологію та сприятиме створенню нових сортів із цінними практичними властивостями. Спосіб може бути використаний у селекційних центрах, науково-дослідних установах та на дослідних станціях.

Виклад основного матеріалу. Найближчим аналогом є спосіб, який полягає у пророщуванні насіння пшениці на розчинах сахарози з високим осмотичним тиском [15]. Він полягає у здатності насіння різних сортів пшениці по-різному проростати на розчинах з високим осмотичним тиском. Як контроль використовують дистильовану воду. Насіння, що має більшу сисну силу, ніж у зовнішнього розчину, характеризують як посухостійке. Тобто високий відсоток пророслого насіння характеризує здатність сорту проростати у ґрунті при недостатніх запасах вологи.

Проте недоліком цього способу є те, що рослини, які вижили після дії осмотика, не зберігаються для подальшого вирощування в польових умовах. Тобто цей метод слугує лише для оцінювання рослин за посухостійкістю, а не для добору кращих з них за вказаною ознакою.

В основу корисної моделі поставлена задача створити спосіб, який дозволить зручно, швидко і максимально ефективно оцінити та відібрати посухостійкі сортозразки пшениці ярої, що в кінцевому рахунку дасть змогу прискорити селекційний процес і зменшити трудовитрати. Поставлене завдання вирішується тим, що в запропонованому способі добору посухостійкого селекційного матеріалу пшениці ярої, що обумовлений токсичною дією стресового чинника, спрямованого проти виживання нестійких форм, згідно із корисною моделлю, добір генотипів проводять за життєздатними проростками після культивування насіння на високоосмотичному розчині сахарози концентрацією 0,9 М у термостаті за температури 21 °С терміном 7 діб.

Запропонований спосіб включає нижче перераховані процеси. Запропонований спосіб включає нижче перераховані процеси. Дослід проводять у трьох повтореннях, використовуючи виповнене насіння однієї репродукції та однакової фракції. З кожного селекційного зразка відбирають насіння по 100 шт. та поміщають у підготовлені чашки Петрі з двома шарами фільтрувального паперу, які попередньо стерилізують у сушильній шафі протягом 2 год при температурі 160 °С. Попередньо маркером позначають кожну чашку (назва зразка, № повторення). На дно кожної чашки поміщають насіння і знезаражують шляхом обприскування розчином дистильованої води з препаратом «Білизна» у співвідношенні 3:1. Для приготування високоосмотичного розчину в 1 л дистильованої води розчинюють 307,8 г сахарози, що відповідає молярній концентрації 0,9 М. Для попередження розвитку інфекцій отриманий розчин необхідно прокип’ятити протягом 15 хв. Чашки Петрі з насінням заливають 10 мл підготовленого розчину і в подальшому пророщують у термостаті при температурі 21 °С протягом 7 днів. В подальшому відбирають життєздатні проростки та висаджують їх у відкритий ґрунт під весняну сівбу.

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

Головні висновки. Таким чином, у результаті дослідження розроблено спосіб добору посухостійкого селекційного матеріалу пшениці ярої. Наведено порівняльну характеристику різних методів в оцінюванні зразків на стійкість до водного дефіциту. Практична значущість представлених напрацювань полягає у їх застосуванні в селекції зернових культур в умовах кліматичних змін, пов'язаних із почастішанням посух і температурними коливаннями. Переваги запропонованого методу над традиційними полягають у можливості працювати з великими вибірками зразків та можливості контролювати умови зовнішнього середовища. Використання представленої розробки дозволяє оптимізувати добір вихідного матеріалу пшениці ярої, підвищити результативність оцінювання та створювати нові сорти із високим рівнем посухостійкості.

Перспективи використання результатів дослідження. Використання розробленого методу сприятиме підвищенню стійкості пшениці ярої до дії несприятливих кліматичних чинників. Запропонований спосіб дозволить повніше реалізувати потенціал продуктивності досліджуваних сортів, закладений у процесі селекції, що зумовить підвищення ефективності їх застосування у рослинництві та селекційній роботі.

Література

1. Базалій В.В., Домарацький Є.О., Базалій Г.Г. та ін. Наукові основи селекції озимої пшениці на агроекологічну адаптивність: монографія. Миколаїв: МНАУ, 2024. 244 с.
2. Cui J., Ding J., Deng S. et al.Wheat breeding strategies under climate change based on CERES-Wheat model. *Computers, Materials & Continua*. 2022. Vol. 72 (3). P. 6107–6118. https://doi.org/10.32604/cmc.2022.027611
3. Рудавська Н.М., Беген Л.Л., Гречешнюк О.В. Вплив агротехнологічних заходів на формування окремих елементів продуктивності пшениці озимої. *Агронаука і практика*. 2025. Вип. 4. Ч. 3. С. 27–32. https://doi.org/10.32636/agroscience.2025-(4)-3-5
4. Johansson E., Muneer F., Prade T. Plant breeding to mitigate climate change – present status and opportunities with an assessment of winter wheat cultivation in Northern Europe as an example. *Sustainability*. 2023. Vol. 15 (16). 12349. https://doi.org/10.3390/su151612349
5. Robles-Zazueta C.A., Crespo-Herrera L.A., Piñera-Chavez F.J. et al. Climate change impacts on crop breeding: Targeting interacting biotic and abiotic stresses for wheat improvement. *The Plant Genome*. 2024. Vol. 17 (1). e20365. https://doi.org/10.1002/tpg2.20365
6. Zahra N., Hafeez M. B., Wahid A. et al. Impact of climate change on wheat grain composition and quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2023. Vol. 103 (6). P. 2745–2751. https://doi.org/10.1002/jsfa.12289
7. Raveena, Bharti R., Chaudhary N. Drought resistance in wheat (Triticum aestivum L.): a review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences.* 2019. Vol. 8 (9). P. 1780–1792. https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.809.206
8. Livneh B., Badger A. M. Drought less predictable under declining future snowpack. *Nature Climate Change*. 2020. V. 10. P. 452–458. https://doi.org/10.1038/s41558-020-0754-8
9. Прядкіна Г.О., Махаринська Н.М., Соколовська-Сергієнко О.Г. Вплив посухи на фотосинтетичні показники рослин пшениці. *Фізіологія рослин і генетика*. 2022. Т. 54, № 6. С. 463–483. https://doi.org/10.15407/frg2022.06.463
10. Бакуменко О.М., Осьмачко О.М., Власенко В.А. та ін. Комбінаційна здатність сортів пшениці озимої Крижинка та Смуглянка. Суми: Мрія, 2019. 194 с.
11. Sugumar T., Shen G., Smith J., Zhang H. Creating climate-resilient crops by increasing drought, heat, and salt tolerance. *Plants*. 2024. Vol. 13 (9). 1238. https://doi.org/10.3390/plants13091238
12. Прокопік Н. І., Чугункова Т. В., Хоменко С. О. Оцінка посухостійкості сортів пшениці м'якої озимої різного еколого-географічного походження за умов осмотичного стресу. *Наукові доповіді НУБіП України*. 2019. № 3 (79). https://doi.org/10.31548/dopovidi2019.03.004
13. Гаврилюк І.В., Ковалишина Г.М. Вплив посухи, спричиненої D-манітолом, на проростання насіння сортів пшениці м'якої озимої. *Землеробство та рослинництво: теорія і практика*. 2024. Вип. 4 (14). С. 100–110. https://doi.org/10.54651/agri.2024.04.12
14. Салій А.М., Рябчун Н.І. Виділення джерел посухостійкості озимої м'якої пшениці в онтогенезі. *Генетичні ресурси рослин*. 2022. № 30. С. 34–43. https://doi.org/10.36814/pgr.2022.30.03
15. Варавкін В.О., Таран Н.Ю. Інтенсивність ростових процесів проростків озимої пшениці (*Triticum aestivum* L.) різної селекції за умов високого осмотичного тиску. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. 2014. № 4. С. 423–428.
16. Almansouri M., Kinet J.M., Lutts S. Effect of salt and osmotic stresses on germination in durum wheat (Triticum durum Desf.). *Plant and Soil*. 2001. Vol. 231. P. 243–254. https://doi.org/10.1023/A:1010378409663
17. Методика державного сортовипробування сільськогосподарських культур / за ред. В.В. Волкодава. 2000. Київ: Алефа, С. 10–50.
18. Talebi R., Fayaz F., Naji A.M. Effective selection criteria for assessing drought stress tolerance in durum wheat (Triticum durum Desf.). *General and Applied Plant Physiology*. 2009. Vol. 35. N 1/2. P. 64–74.
19. Solangi A.H., Solongi N., Jatoi W.A. et al. Drought tolerance indices of wheat (Triticum aestivum L.) genotypes under water deficit conditions. *Plant Cell Biotechnology and Molecular Biology*. 2021. Vol. 22. P. 1–19.
20. Спосіб добору посухостійкого селекційного матеріалу пшениці ярої: пат. 162593 Україна: МПК A01H 1/04. No 202502110; заявл. 05.05.2025; опубл. 08.04.2026, Бюл. № 14.

Дата першого надходження статті до видання: 30.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 504.064:622.016.02
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.44

ВПЛИВ РІДКИХ ВІДХОДІВ БУРІННЯ НА ДОВКІЛЛЯ

Дригулич С.П.[1], **Орфанова М.М.**[1], **Дригулич П.Г.**[2]
[1]Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, 76019, м. Івано-Франківськ
[2]ГО «Центр сталого розвитку громад»
вул. Кн. Ольги, 16/65, 82107, м. Дрогобич
serhii.dryhulych@nung.edu.ua, mariia.orfanova@nung.edu.ua, pzy@ukr.net

Проведено аналіз літературних джерел щодо негативного впливу процесу влаштування нафтогазових свердловин та відходів буріння на довкілля. Проаналізовано вимоги нормативно-правових документів з охорони довкілля та раціонального природокористування. Опрацьовано державні статистичні спостереження щодо обсягів буріння, водокористування та утворення відходів буріння під час влаштування нафтогазових свердловин у Дніпровсько-Донецькій западині. Порівняно вплив застарілого та сучасного бурового обладнання, бурових розчинів і технологій на довкілля. Розглянуто питання сучасних методів буріння, використання різних бурових установок та їхній вплив на окремі компоненти довкілля, облаштування шламових амбарів, використання екологічно безпечних хімічних реагентів для оброблення бурових розчинів, проведення робіт з технічної рекультивації порушених земель, нейтралізації відходів буріння, очищення, повторне використання, відновлення та видалення бурових стічних вод. Проведено аналіз протоколів лабораторних досліджень бурових стічних вод з різних свердловин у Дніпровсько-Донецькій западині, буріння яких здійснюється трьома відділеннями Бурового управління «Укрбургаз» АТ «Укргазвидобування». Опрацьовано найбільш нагальні питання громадськості під час проведення громадських слухань, проаналізовано звіти з оцінки впливу на довкілля та розділи з оцінки впливу на навколишнє середовище проектної документації на влаштування нафтогазових свердловин.

В лабораторних умовах проведено дослідження коагуляційного очищення бурових стічних вод, шляхом інтенсифікації осадження мінеральних і органічних забруднювальних речовин, з додаванням сірчано-кислого алюмінію у різних пропорціях. Запропоновано організаційно-технічні заходи щодо мінімізації негативного впливу на довкілля бурових стічних вод та інших відходів. *Ключові слова:* завершальна стадія розробки, хімічні реагенти, відходи буріння, бурові стічні води, відпрацьовані бурові розчини.

Environmental aspects of waste management during the construction of oil and gas wells. Dryhulych S., Orfanova M., Dryhulych P.

An analysis of literary sources on the negative impact of oil and gas well construction and drilling waste on the environment was conducted. The requirements of regulatory and legal acts on environmental protection and rational nature management were analyzed. State statistical observations and other materials on the volumes of drilling, water use, and drilling waste generation during the construction of oil and gas wells in the Dnipro-Donets Basin were studied. The impact of outdated equipment, drilling fluids, and modern drilling rigs and technologies was compared. The issues of modern drilling methods, the use of various drilling rigs and their impact on certain aspects of the environment, the construction of reserve pits, the use of environmentally safe chemical reagents for the treatment of drilling fluids, the implementation of technical land reclamation, the neutralization of drilling waste, the purification, reuse, restoration, and disposal of drilling wastewater. An analysis of laboratory test reports for drilling wastewater from various wells in the Dnipro-Donets Basin was conducted, which are drilled by three divisions of the Drilling Department of Ukrburgaz, a subsidiary of JSC Ukrgazvydobuvannya. The most pressing issues raised by the public during public hearings were addressed, and environmental impact assessment reports and sections on environmental impact assessment in project documentation for the construction (installation) of oil and gas wells were analyzed.

Laboratory studies were conducted on the coagulation treatment of drilling wastewater by intensifying the sedimentation of mineral and organic pollutants with the addition of sulfuric acid aluminum in various proportions. Organizational and technical measures are proposed to minimize the negative impact of drilling wastewater and other waste on the environment. *Key words:* final stage of development, chemical reagents, drilling waste, drilling wastewater, spent drilling fluids.

Постановка проблеми та актуальність дослідження. Нафтогазова галузь України забезпечує значну частину енергетичних потреб держави, особливо під час широкомасштабної агресії російської федерації. Існуюча структура виробничих об'єктів, її розосередженість в різних регіонах України, навіть під час масованих обстрілів і бомбардувань, дозволяє забезпечувати енергоносіями суб'єктів господарювання та населення України. Однак обсяги видобування вуглеводнів не можуть у повній мірі забезпечити всі потреби країни, тому що родовища виснажені, або знаходяться на завершальній стадії.

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

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

За останні два десятиліття не було відкрито жодного великого нафтового чи газового родовища (згідно з класифікацією [1] великі родовища – 30 – 100 млн. т нафти, 30 – 100 млрд. м^3 газу). Найбільш перспективний Південний нафтогазоносний регіон, що охоплює шельф Азовського та Чорного моря та прилеглі території знаходяться під тимчасовою окупацією. Також окупованою є частина території Східного нафтогазоносного регіону -південно-східна частина Дніпровсько-Донецької западини (далі – ДДЗ), інші окремі її райони знаходяться на лінії фронту чи прилягають до неї. Територія Західного нафтогазоносного регіону також зазнає впливу військової агресії з боку російської федерації. Але навіть у таких надзвичайно складних умовах підприємства нафтогазової галузі України (далі – НГУ) здійснюють пошуки, розвідку та розробку родовищ нафти і газу.. Важливим для енергетичної незалежності України та стабільного розвитку економіки країни є нарощування обсягів розвідувального буріння і, особливо, експлуатаційного буріння на родовищах, які заходяться на завершальній стадії розробки.

Збільшення обсягів буріння призводить до збільшення обсягів відходів, що створює додаткове навантаження на довкілля, зокрема на ґрунти та ґрунтові води, у місцях проведення бурових робіт. Тому під час проведення громадських слухань процедури з оцінки впливу на довкілля питання негативного впливу на довкілля процесу спорудження свердловин та питання управління відходами буріння є найбільш актуальними для місцевого населення [2].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 21 квітня 2023 р. № 373-р. схвалено Енергетичну стратегію України на період до 2050 року [3]. Основними принципами Стратегії визначено економічну обґрунтованість, екологічність, доступність, соціальну справедливість та ринковість. У Концепції розвитку газовидобувної галузі України зазначено, що збільшення обсягів власного видобутку природного газу є дієвим інструментом зменшення залежності України від імпорту енергоносіїв та забезпечення енергетичної безпеки держави [4]. Також розпорядженням Кабінету Міністрів України від 8 листопада 2017 р. № 820-р було затверджено Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року, яка вимагає вжиття негайних заходів щодо вирішення критичної ситуації, яка склалася з утворенням, накопиченням, зберіганням значних обсягів відходів і наголошує про подальший розвиток екологічних загроз та інших ризиків [5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженням негативного впливу відходів буріння на довкілля та інших негативних чинників НГУ займалась значна кількість науковців і фахівців-практиків.

У науковій праці [6] здійснено бібліометричний аналіз з 1994 по 2021 рік, який засвідчив зростання уваги науковців до питання деградації навколишнього середовища, пов'язаної з діяльністю нафтогазової галузі, та необхідності пом'якшення негативних наслідків.

Багато наукових праць присвячено дослідженню впливу розроблення нафтогазових родовищ та визначено багатофакторність впливу технологічних процесів на геологічне середовище, поверхневі та ґрунтові води середовище [7-11]. Аналіз життєвого циклу нафтогазової свердловини, проведений Яцишин Т. М. [7], дозволив визначити критерії управління екологічними ризиками на нафтогазових об'єктах.

Пукіш А. В. та інші науковці [8, 9] досліджували вплив на довкілля процесу розробки нафтогазових родовищ на завершальній стадії. Встановлено, що у Карпатському регіоні поширена неконтрольована еманація нафти і газу на денну поверхню, що призводить до загазованості територій, у т.ч. населених пунктів, наприклад Борислав, Битків. Увага приділяється наслідкам аварійних ситуацій і забрудненню довкілля через розливи супутньо-пластових вод, потраплянню нафти на поверхню ґрунту з наступною її фільтрацією у нижні горизонти ґрунтового покриву. Дослідження дозволили визначити важливість мінімізації впливу неконтрольованих еманацій вуглеводнів та розробити науково-практичні основи захисту довкілля та напрямки покращення екологічної ситуації на об'єктах нафтогазової галузі.

Adindu Donatus Ogbu, Williams Ozowe & Augusta Heavens Ikevuje дослідили важливість використання дата-технологій для вдосконаленні методів нафтовидобутку з метою їх оптимізації та зменшення впливу на навколишнє середовище [10].

Окремим питанням постає забруднення довкілля на території старих нафтопромислів, що висвітлено у дослідженнях Yatsyshyn T.M., Lyakh M.M., Orfanova M.M., Glibovytska N.I., Gavryliv S.Yu., Lyakh V-D.M. [9, 11].

Не менш актуальними є забруднення навколишнього середовища відходами буріння, до яких належать бурові стічні води (далі БСВ) та буровий шлам (далі БШ). Глібовицька Н. І., Плаксій Л. В. [12] досліджують типи бурових розчинів і зазначають, що найбільш небезпечними компонентами відходів буріння для біоти є гідроксиди натрію кальцію та хлориди, які містяться у бурових розчинах, що зумовлюють зміщення кислотної рівноваги ґрунтового розчину. Хлорид калію, карбонати натрію і кальцію теж відзначаються токсичним впливом на екосистеми, оскільки спричиняють засолення ґрунтів, знижують доступність води та біогенних елементів до рослин, порушують цілісність та функціонування рослинного організму. Запропоновано поєднувати технічні та біологічні методи для боротьби із забрудненням довкілля відходами буріння з нафтопродуктами.

У роботі [13] науковцями Яцишин Т. М. і Глібовицькою Н. І. доводяться перспективи використання фітоіндикації та фіторемедіації на техногеннотрансформованих територіях нафтогазовидобутку.

У наукових працях [14-19] проаналізовано склад бурових розчинів, різні типи хімічних реагентів, які використовуються у їх складі в залежності від умов буріння, склад промивальних рідни, бурових шламів і вплив відходів буріння на навколишнє середовище.

Аблєєва І. Ю., Бартош Е. Ю., Боруха О. Р. у своїх дослідженнях [14] пов'язують склад БСВ і БШ з негативним їх впливом на довкілля та пропонують систему очистку БСВ для підвищення рівня утилізації відходів.

Рикусова Н. І., Шестопавлов О. В. [15, 16] оцінюють екологічну небезпеки процесу буріння свердловин. Довели, що склад БШ залежить від його мінерального складу і властивостей бурового розчину. Особливої уваги заслуговують наведені дані щодо значного вмісту нафтопродуктів 10-5300 мг/л у складі БСВ. Автори вважають, що найбільш оптимальним рішенням щодо утилізації відходів є безамбарний спосіб буріння нафтогазових свердловин, під час якого відбувається розділення відходів на БСВ, відпрацьований буровий розчин та шлам (вибурена порода) без прямого їх скидання в амбар. Однак авторами не запропоновано жодних рішень щодо об'єктів оброблення цих відходів, особливо що стосується БСВ та відпрацьованих бурових розчинів, які не піддаються відновленню, оскільки такі об'єкти у переважної більшості нафтогазовидобувних підприємств та суб'єктів господарювання у сфері управління відходами – відсутні.

Пукіш А. В., Мельник О. Д. [17] провели дослідження хімічного складу та фізико-хімічних властивостей бурових стічних вод, визначили основні джерела забруднення довкілля на завершальній стадії розробки нафтогазових родовищ. Проведені лабораторні дослідження процесів коагуляції з використанням нових реагентів для очищення БСВ з різних родовищ Східного та Західного нафтогазоносних регіонів дозволили виділити етапи коагуляції, що відповідають на графіку трьом ділянкам кінетичних кривих: ОА – повільна коагуляція, АБ – швидка коагуляція, БВ – закінчення коагуляції.

Huihui Zhang та інші науковці [18] показали перспективність для очистки стічних вод від бурових установок безпосередньо під час їх утворення використання коагулянту на основі полісилікат алюмінію-заліза (PSAF).

Ігнатов А. О. та інші [19] встановили високу мінералізації (5–8%) бурових промивальних рідинах та високий вміст нафтопродуктів (до 900 мг/кг) у ґрунтах на території бурових, пропонують удосконалення системи водопостачання свердловин.

Згідно з інформацією Міністерства економіки, довкілля та сільського господарства України в нашій державі є лише один суб'єкт господарювання (ТОВ "Вітабуд"), який має відповідні дозвільні документи та володіє об'єктом для оброблення небезпечних відходів буріння, згідно Національного переліку відходів, а саме:

01 05 05* Бурові розчини та відходи, що містять нафтопродукти;

01 05 06*Бурові розчини та інші відходи, що містять небезпечні хімічні речовини.

Новизна. Проведено аналіз бурових стічних вод зі шламових амбарів нафтогазових свердловин у Дніпровсько-Донецькій западині. Проаналізовано нормативну документацію, звіти з оцінки впливу на довкілля, матеріали громадських слухань щодо управління рідкими відходами буріння. Напрацьовано проєкти внесення змін до нормативно-правових актів, запропоновано методи відновлення, повторного використання та видалення бурових стічних вод.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічна основа дослідження охоплює аналіз нормативно-правових актів України щодо правил екологічної безпеки при влаштуванні нафтогазових свердловин, технічній рекультивації земель, оброблені відходів буріння.

Загальнонаукове значення полягає виборі методів екологічно-безпечного управління відходами буріння.

Викладення основного матеріалу. Результати досліджень. Дослідження проводилися у районі проведення бурових робіт в Дніпровсько-Донецькій западині на території Полтавської та Харківської областей. В орографічному відношенні територія району – хвиляста рівнина, розчленована мережею балок, ярів та річкових долин, переважна частина території належить до лісостепу, а в Харківській області значна частина – до степу. Район розміщений у межах Лівобережно-Дніпровсько-Приазовської північно-степової фізико-географічної провінції. Належить до посушливої, дуже теплої агрокліматичної зони. Середньорічна кількість опадів становить від 540 до 572 мм. В гідрогеологічному відношенні район дослідження відноситься до південно-східної частини Дніпровсько-Донецького артезіанського басейну, де підземні води пов'язані системою водоносних горизонтів, які поверхово змінюють один одного і розділені водотривкими відкладами – породами покришками.

За даними [20, 21] обсяги проходки в цілому по АТ «Укргазвидобування» протягом 2020-2025 років досягли таких результатів: 2020 рік – 124367 м; 2021 рік – 209 665 м; 2022 рік – 215 215 м; 2023 рік – 325 627 м; 2024 рік – 370 004м, а в 2025 році сягнули рекордної відмітки 419 060 м!. Левова частка проходки припадає на свердловини, що були пробурені в ДДЗ.

Збільшення обсягів буріння призводить до зростання обсягів утворення відходів, зокрема від-

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

ходів буріння. Так за даними державних статистичних спостережень (форма № 1-відходи (річна) «Звіт про відходи») протягом 2020-2025рр. в АТ «Укргазвидобування» утворилося 1 296 694 т відходів буріння. Інформація про обсяги утворення відходів буріння, обсяги проходки та водоспоживання філією БУ “Укрбургаз” АТ “Укргазвидобування" наведені у табл. 1 та на рис. 1.

Клас небезпеки відходів та їхній код визначався згідно із [22, 23]. У статистичних спостереженнях і у таблиці 1 міститься інформація тільки про два види відходів – бурові розчини та відходи, що містять нафтопродукти (код 01 05 05*) та інші відходи цієї підгрупи (код 01 05 99), однак не наведена інформація про окремі складові відходів буріння, а саме: прісноводні бурові розчини та відходи (код 01 05 04); бурові розчини та відходи, що містять барит, інші, ніж зазначені за кодами 01 05 05 і 01 05 06 (код 01 05 07); бурові шлами та відходи, що містять хлориди, інші, ніж зазначені за кодами 01 05 05 та 01 05 06 (код 01 05 08).

Зростання обсягів буріння призвело до значного зростання обсягів водоспоживання, об’ємів утворення відходів буріння, зокрема відпрацьованих бурових розчинів та бурових стічних вод, у т.ч. відходів, які можна віднести до бурових шламів та відходів, що містять хлориди, інші, ніж зазначені за кодами 01 05 05 та 01 05 06 (код 01 05 08).

Склад БСВ в основному залежить від типу бурових розчинів та хімреагентів, які використовуються для їх приготування, порід геологічного розрізу свердловини і їх наповнення пластовими флюїдами, особливо та під час ускладнення при поступленні цих флюїдів у свердловину під час нафто-газо-водопроявлення [25-27].

В АТ «Укргазвидобування» використовуються в основному бурові розчини на водній основі: глинисті; полімерно-глинисті; полімерно-глинисті частково мінералізовані; мінералізовані; хлоркалієві (хлоркалієвий високоінгібований, безглинистий хлоркалієвий, обважнений хлоркалієвий, полімер-калієвий (біополімерний). Хлоркалієві розчини на водній основі використовуються під час проходки соленосних відкладів, які перенасичені хлористим калієм з метою уникнення розчинення соляних товщ. Для розкриття продуктивних горизонтів можуть

Таблиця 1

Роки	2020	2021	2022	2023	2024		2025	
Клас небезпеки	IV клас	IV клас	IV клас	IV клас	відходи, що не є небезпечними	небезпечні	відходи, що не є небезпечними	небезпечні
Код відходів	1110.2.9.08	1110.2.9.08	1110.2.9.08	1110.2.9.08	01 05 99	01 05 05*	01 05 99	01 05 05*
Обсяг, т	50512,089	179007,882	169194,025	334396,175	267557,994	5603,605	279224,344	11197,272
Обсяг буріння, м	124 367	209 665	215 215	325 627	370 004		419 060	
Водоспоживання, тис м. куб.	75,918	476,870	386,504	417,001	623,560		306, 201*	

*Примітка: 29 свердловин бурилися на привозній воді з інших джерел

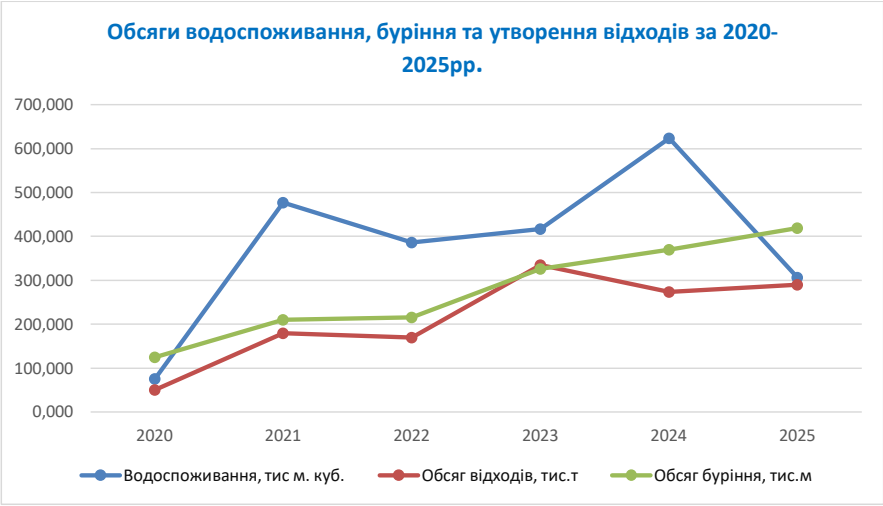


Рис. 1. Діаграма про обсяги водоспоживання, буріння та утворення відходів

використовуватися розчини на водній основі, безглинисті полімерні бурові розчини. Значно рідше, на окремих родовищах при проходці продуктивних горизонтів використовуються промивальні рідини на вуглеводневій основі (дизельному паливі). При чому відходи буріння з розчинів на вуглеводневій основі зберігаються окремо, тому їх вплив на БСВ є незначним.

На даний час в Україні існують такі вимоги нормативно-правових актів щодо управління відходами буріння, у т. ч. БСВ.

Згідно з [1] передбачено нейтралізацію та захоронення відпрацьованих бурових стічних вод, промивальних рідин та бурового шламу на території бурового майданчика у шламових амбарах за умови надійної гідроізоляції амбарів чи передавати на оброблення суб'єктам господарювання у сфері управління відходами, або здійснювати захоронення стічних вод у надра відповідно до вимог чинного законодавства.

У розділі Природоохоронні вимоги до проектування і спорудження нафтових та газових свердловин у п. 7.12 [28] зазначено, що заборонено скидати неочищені стічні води, які містять завислі частинки, органічні та інші забруднювачі на поверхню ґрунту, в поверхневі водойми та підземні горизонти.

Донедавна, згідно нормативних документів, які втратили чинність, технологія очищення бурових стічних вод хімічними методами, а саме коагуляційне очищення шляхом інтенсифікації осадження мінеральних і органічних забруднювальних речовин, що перейшли в стан суспензії, і доведення параметрів очищеної води до нормативних показників, які дозволяють використовувати її повторно для технологічних потреб бурової. В якості коагулянтів переважно використовують сірчанокислий алюміній (сульфат алюмінію ($Al_2(SO_4)_3$) та інші коагулянти, які закладені в проектно-кошторисній документації. При чому згідно [28] витрати коагулянту $Al_2(SO_4)_3$ для оброблення 1 м^3 БСВ, в перерахунку на суху речовину, становить 1,0-5,0 кг/м^3.

Якщо параметри очищеної води не перевищують таких значень:

- нафтопродукти 50 – 100 мг/л;
- мінералізація, не більше – 4500 мг/л;
- pH – 5,5-8,2,

то таку воду можна відводити на рельєф місцевості, прилеглої до бурового майданчика!

При невідповідності очищеної води нормативним параметрам її доочищають повторною обробкою коагулянтами і флокулянтами або іншими доступними методами.

При високому вмісті мінеральних солей освітлена БСВ розводиться чистою прісною водою до допустимої межі.

Наведені вище норми щодо параметрів очищення, розбавлення та відведення на рельєф БСВ суперечать чинному законодавству, особливо якщо ці відходи мають небезпечні властивості, зокрема у Водному кодексі України (ст.70 «*Скидати стічні води, використовуючи рельєф місцевості (балки, пониззя, кар'єри тощо), забороняється)* [29], ЗУ «Про управління відходами» (ст.7. «*2. Зміна класу небезпечних відходів не повинна досягатися шляхом розбавлення або змішування відходів для зниження початкової концентрації небезпечних речовин до рівня, що є нижчим за порогові значення, для визначення відходів небезпечними*) [22].

Також це суперечить [30], у Додатку 1 якого нафту і нафтопродукти віднесено до першої групи небезпеки, як надзвичайно небезпечні, ГДК/ОДК для яких встановлено менше 0,2 мг/кг. Таким чином скидаючи на рельєф БСВ, які містять нафтопродукти у кількості 50 – 100 мл/л додатково забруднюються ґрунти на прилеглій території.

Крім цього, не можна передавати ці БСВ для очищення суб'єктам господарювання, які володіють системами централізованого водовідведення, оскільки у переважній більшості проб (Таблиця 2) вони містять забруднюючі речовин з перевищенням допустимих концентрацій, установлених [31] та місцевими правилами приймання стічних вод. Згідно [31] Додатку 4 максимально допустиме значення показника та (або) концентрація в пробі стічних вод, має становити для хлоридів (Cl-) 350,0 мг/дм$^{-3}$; сульфатів (SO_4^{-2}) 400,0 мг/дм$^{-3}$; нафти та нафтопродуктів – 10,0 мг/дм$^{-3}$.

Як видно з наведених даних, щоб досягнути допустимих значень окремих показників в пробі стічних вод, особливо що стосується концентрації хлоридів, необхідно розбавляти БСВ прісною водою у співвідношенні 1:10, інколи навіть і більше!

Слід зазначити, що на даний час ситуація щодо негативного впливу на довкілля проведення бурових робіт у порівнянні з минулими періодами значно покращилася, за рахунок використання сучасних бурових установок, у т.ч. мобільних бурових установок, скорочення термінів буріння, змін у технології проведення бурових робіт, очищенні бурових розчинів, використанні екологічно безпечних хімреагентів у рецептурах приготування бурових розчинів, облаштуванні під'їзних шляхів до бурових майданчиків, рекультивації земель, придбанні новітнього бурового обладнання, використання полімерних матеріалів для гідроізоляції амбарів (геомембрана HDPE), біодеструкторів та сорбентів нафтових забруднень тощо.

Наведемо приклад вигляду шламових амбарів на буровій кінця 1990-х початку 2000-х років (рис.2), коли шламові амбари у кращому випадку гідроізолювалися поліетиленовою плівкою щільністю 200 мікрон, яка не витримувала жодних механічних навантажень і ультрафіолетового випромінювання, і сучасного бурового майданчика зі шламовими амбарами гідроізольованими геомембраною HDPE товщиною 1,0 мм (рис. 3).

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

Таблиця 2

Результати дослідження бурових стічних вод

Назва об'єкту дослідження	Дата протоколу	Показники							
		Водневий показник, pH	Густина, г/см³	Завислі частини, мг/л	Сухий залишок, мг/л	Прожарений залишок, мг/л	Хлориди, мг/л	Сульфати, мг/л	Нафтопродукти, мг/л
св.№367 Яблунівського НГКР	29.07.21	7,87	1,015	2328,0	18255,8	10803,5	8316,6	835,35	8,3
св.№300 Зах.Солохівського ГКР	07.10.21	7,86	1,017	160,0	9146,0	5412,4	3615,9	489,69	9,50
св .№2 Скиданівського ГКР	07.05.21	12,0	1,030	392,0	59017,8	34926,0	32756,0	2827,01	19,10
Коломацьке ГКР св. № 40	04.08.22	11,1	1,025	2818,0	21050,0	11244,0	11645,0	111,93	39,0
Розпашнівське ГКР св. № 103	28.07.22	8,65	1,006	338,0	6004,0	4034,0	3105,0	154,0	22,4
св. №28 Комишнянського ГКР	23.06.22	9,80	1,065	21698	38620,4	57920,5	34160,0	110,28	36,10
св. №126 Машівського ГКР	22.12.22	10,5	1,001	42,0	2600,0	4150,0	2212,1	155,55	1,20
св. №129 Котелевського ГКР	29.09.22	8,20	1,020	278,0	18500,0	26136,0	12382,0	156,37	5,7
св. №6 Скиданівського ГКР	10.02.22	8,50	1,040	1212,0	66405,4	44180,4	37329,0	773,62	15,70
св. №386 Яблунівського ГКР	28.12.22	8,76	1,015	506,0	7910,5	5100,0	4328,5	152,26	10,90
св. №92 Зах. Соснівського ГКР	07.07.22	7,80	1,047	125,8	58820,0	53004,0	28204,0	1723,45	2,60
св.№30 Комишнянського ГКР	10.02.23	8,08	1,005	594,0	6250,0	4864,0	3821,5	152,26	2,90
Шебелинське ГКР, св.№680	10.02.23	7,91	1,005	182,0	3340,2	5610,0	3197,6	50,20	4,40
св.№129 Котелевського ГКР	23.02.23	12,3	1,035	272,0	35464,0	50318,0	26517,0	312,74	5,10
св. №220 Опішнянського ГКР	10.02.23	8,73	1,002	232,0	3255,0	2148,0	1715,8	144,44	5,20
св .№532 Зах. Хрестищенського ГКР	23.02.23	7,59	1,020	58,0	27776,0	16150,0	15598,0	342,29	2,20
св .№141 Березівського ГКР	12.01.23	8,28	1,015	962,0	15060,0	10350,5	8578,9	154,72	12,90
св. №241 Солохівського ГКР	16.02.23	7,55	1,030	690,0	41120,0	29699,0	24645,0	159,66	12,10
св. №132 Котелевського ГКР	23.08.24	9,66	1,100	10042	161246	141192	74445,0	5530,56	15,80
св. №166 Єфремівського ГКР	27.09.24	7,90	1,010	1600,0	15348,0	13024,0	4892,1	2069,02	8,90
св №187 Єфремівського ГКР	27.09.24	8,24	1,002	1200,0	6220,0	4956,0	2977,8	490,51	14,90
св. №68 Комишнянського ГКР	24.05.24	7,15	1,003	176,0	9944,0	8440,0	4431,3	1315,98	19,40
св. №94 Східно-Полтавського ГКР	16.05.24	7,72	1,045	6786,0	79288,0	41500,0	38410,0	47,73	19,40
св. №580 Західно-Хрестищенського ГКР	14.05.24	8,30	1,010	1220,0	8124,0	7136,0	4165,4	321,79	29,70
св. №550 Західно-Хрестищенського ГКР	14.05.24	8,10	1,005	694,0	10156,0	8228,0	7267,3	483,10	23,60
св. №120 Веснянського НГКР	14.05.24	7,90	1,006	1238,0	8500,0	6300,0	5317,5	318,5	50,20
св. Ns141 Березівського ГКР	01.04.24	7,00	1,007	480,0	17512,0	8972,0	6646,9	2180,95	16,20
св. №135 Машівського ГКР	03.05.24	8,24	1,002	284,0	5152,0	3256,0	2304,3	282,29	24,90
св. №101 Соснівського ГКР	07.10.24	8,87	1,010	724,0	9896,0	7304,0	3084,2	1229,56	12,20
св. №170 Єфремівського ГКР	10.12.24	8,60	1,018	630,0	9500,0	5700,0	4874,4	688,03	41,90
св. №529 Медведівського ГКР	23.04.25	8,10	1,015	772,0	6440,0	4196,0	3573,4	137,44	23,70
св. №101 Семенцівського ГКР	07.05.25	7,57	1,017	330,0	38784,0	27148,0	23397,0	2780,09	7,20
св. №115 Веснянського НГКР	15.10.25	10,30	1,115	874,0	164080	118920	114964	2487,11	8,40

Продовження таблиці 2

св. №527 Медведівського ГКР	19.11.25	8,50	1,013	460,0	17600,0	8644,0	6664,6	542,37	3,40
св. №70 Коломацького ГКР	02.12.25	6,60	1,017	582,0	15140,0	9848,0	7568,6	1296,23	2,50
св.№678 Шебелинського ГКР	10.02.26	8,00	1,012	1018,0	15460,0	13248,0	3190,0	391,75	50,30
св.№1 Пд.Білозірського ГКР	17.03.26	8,08	1,020	980,0	20384,0	10644,0	6381,0	966,18	8,00



Рис. 2. Шламові амбари на майданчику свердловини №125 Рудівсько-Червонозаводського ГКР.



Рис. 3. Сучасний протифільтраційний екран з геомембрани HDPE

На рис. 2 зображено три шламові амбари, водна поверхня яких вкрита суцільною плівкою нафтопродуктів (далі – ПММ). Ці ПММ потрапили в амбари через використання застарілого обладнання, виробленого ще за часів радянської доби: бурові установки Уралмаш – 3Д-76, з дизельним приводом, з використанням двигунів внутрішнього згоряння (далі також – ДВЗ) різного типу В2-450, В2-500 та

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

В2-550, рідше – двигунів Vola, польського виробництва. Двигуни типу В2 – це V-подібний 12-циліндровий чотирьохтактний дизельний двигун водяного охолодження (далі також – ДВЗ). Разом ці 5-7 двигунів через свою зношеність та недосконалість споживали протягом доби 80-100 л дизельної оливи, значна частина якого потрапляла в шламові амбари. Також з редукторів, насосів тощо через негерметичні ущільнення механічних частин протікали індустріальні оливи і потрапляли в шламові амбари. При цьому протягом буріння глибокої свердловини з водної поверхні амбарів інколи збирали 20-50 м^3 нафтоводяної емульсії.

Крім цього, оскільки більшість родовищ знаходяться на завершальній стадії, з низькими пластовими тисками, з метою зменшення гідростатичного тиску, до бурових розчинів додавали товарну нафту, у кількості до 10%, інколи навіть і більше. У якості змащувальної добавки до бурових розчинів додавалася також товарна нафта в концентраціях від декількох відсотків до 10-15%. При очищенні чи заміні бурових розчинів, ці відходи потрапляли у шламові амбари разом з вуглеводнями.

Збільшення обсягів відходів буріння і переповнення шламових амбарів відбувалося також і за рахунок дощових і талих, оскільки терміни буріння глибоких свердловин тоді становили від одного до трьох років, а планування бурових майданчиків та розташування бурового обладнання було недосконалим. Також наповнення амбарів відбувалося за рахунок використання проточної води для охолодження радіаторів застарілих двигунів та гідрогальма бурової лебідки. При чому наявність суцільної плівки нафтопродуктів на водяній поверхні амбарів мінімізує

На даний час, в АТ «Укргазвидобування» використовуються сучасні бурові установки різної вантажопідйомності, з верхнім приводом, типу Honghua ZJ70-DBS та інші (виробництва Китаю), Bentec SR 6500 (виробництва Німеччини) з дизель-електричним приводом, значно рідше типу НБО-Д на базі модернізованого бурового верстату Уралмаш-3Д, з дизель-електричним приводом та мобільні бурові верстати типу Honghua ZJ30 та інші. Ці бурові установки обладнанні сучасними ДВЗ типу Caterpillar 3512 C потужністю 1100 кВт, Cummins KTA 50 DR потужністю 1306 кВт, G12V190PZL-3 потужністю по 735 кВт, дизель-генераторами Caterpillar 3406 C потужністю 331 кВт, Power Generation потужністю 550 кВт, GS-300 Атлантик (Volvo) потужністю 300 кВт та іншими ДВЗ зарубіжного виробництва, з мінімальним споживанням моторних олив, без потрапляння їх в амбари. Ці дизель-електростанції розташовуються на гідроізольованих площадках, подалі від гирла свердловини. Біля кожного сапуна з ДВЗ встановлено піддони для збору відпрацьованого мастила, сажі тощо (рис. 4), при цьому обсяг утворення відходів від цих ДВЗ – не значний, декілька кілограмів протягом кварталу. Зберігання пального здійснюється в належно облаштованих складах ПММ.

Мінімізує негативний впив на довкілля те, що в АТ «Укргазвидобування» не використовується нафта у якості змащувальної добавки, за виключенням окремих випадків та під час встановлення нафтових ванн з метою ліквідації прихоплення бурильної колони. Але при цьому, після ліквідації аварійної ситуації «пачку» нафтової ванни вилучають з циркуляції для її повторного використання на інших свердловинах.



Рис. 4. Автономні дизель-електричні станції сучасних бурових установок

В залежності від фільтраційних властивостей ґрунтів, шламові амбари облаштовують протифільтраційними екранами з геомембрани HDPE товщиною 0,5-1,0 мм, або полімерно-глинистим екраном.

В результаті цих заходів, нафтопродукти в шламових амбарах на більшості свердловин відсутні (рис. 3, 5).

Головні висновки. У зв'язку з тим, що з часу набуття чинності ГСТУ 41-00032626-00-007-97 [28] і ГСТУ 41-00032626-00-023-2000 [32] відбулися значні зміни у нормативно-правовій базі України, у технології проведення бурових робіт, приготуванні та очистці бурових розчинів, та керуючись вимогами ч.3 Прикінцевих та перехідних положень [33], необ-



Рис. 5. Шламовий амбар свердловини № 580 Західно-Хрестищенського ГКР з протифільтраційним екраном з ПАА та глини

хідно терміново вжити заходів щодо розроблення на їх основі нових Національних стандартів, а саме:

1. Розробити нові методи очищення БСВ, заборонити їх скидання на рельєф поза межі бурових майданчиків, оскільки за допомогою сірчано-кислого алюмінію осаджуються тільки завислі речовини.

2. Впровадити більш широке повторне використання БСВ з невисокою мінералізацією для оброблення бурових розчинів.

3. Розглянути можливість часткової заміни прісних підземних вод у разі їх сумісності з доочищеними БСВ для раціонального використання водних ресурсів у системах підтримки пластового тиску.

4. У разі інтенсивних водопроявлень і значного поступлення СПВ до свердловини під час її буріння, випробовування чи освоєння, після очищення, дослідження фізико-хімічних властивостей та сумісності з іншими водами, розглянути можливість їх повернення у підземні горизонти нафтогазових родовищ через скидові свердловини.

Повернення СПВ разом з БСВ у надра необхідно розглядати як екологічний захід, який є найефективнішим, має на меті збереження навколишнього природного середовища та відповідає вимогам екологічної безпеки.

5. Для БСВ, які не піддаються очищенню, або економічно не вигідно проводити їх очистку, необхідно отримати дозвіл на ділянку надр, відповідні дозвільні документи на управління відходами і здійснювати їх захоронення у підземні водоносні горизонти.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати досліджень можуть бути використані при перегляді нормативно-правових актів, розробленні проектно-кошторисної документації, підготовці звітів з оцінки впливу на довкілля та можуть бути впроваджені на практиці при виконанні робіт з технічної рекультивації землі, відновленні та видаленні рідких відходів буріння, що мінімізує негативний вплив буріння на довкілля.

Література

1. Про затвердження Правила розробки нафтових і газових родовищ : Наказ М-ва екології та природних ресурсів України від 15 берез. 2017 р. № 118. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0692-17#Text (дата звернення: 28.03.2026).
2. Спорудження пошукової свердловини №1 Дачної площі з метою розвідки покладів газу і конденсату, підземні споруди. Підключення свердловини до установки підготовки вуглеводневої сировини : Протокол громадських слухань від 14 трав. 2019 р. URL: https://surl.li/okdsqt (дата звернення: 28.03.2026).
3. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року : Розпорядження Кабінету Міністрів від 21 квіт. 2023 р. № 373-р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-%D1%80#Text (дата звернення: 28.03.2026).
4. Про схвалення Концепції розвитку газовидобувної галузі України : Розпорядження Кабінету Міністрів від 28 груд. 2016 р. № 1079-р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1079-2016-%D1%80#Text/ (дата звернення: 28.03.2026).

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

5. Про схвалення Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року : Розпорядження Кабінету Міністрів від 8 лист. 2017 р. № 820-р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80#Text (дата звернення: 28.03.2026).
6. Justine Klaire Tamala, Edcel Iolo Maramag, Kaye Anne Simeon, Jonathan Jared Ignacio. A bibliometric analysis of sustainable oil and gas production research using VOSviewer. *Cleaner Engineering and Technology*. 2022. Volume 7, 100437 URL: https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100437 (дата звернення: 28.03.2026).
7. Яцишин Т. М. Розроблення наукових основ запобігання розвитку екологічно-небезпечних процесів нафтогазовидобувними об'єктами : дис. ... д-ра техн. наук : 21.06.01 / Івано-Франківський нац. техн. ун-т нафти і газу. Івано-Франківськ, 2021. 418 с. URL : http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/8759 (дата звернення: 28.03.2026).
8. Пукіш А. В. Науково-практичні основи захисту довкілля під час розробки нафтогазових родовищ України на завершальній стадії: дис. … д-ра техн. наук : 21.06.01 / Івано-Франківський нац. техн. ун-т нафти і газу. Івано-Франківськ, 2019. URL : https://surl.li/rlexol (дата звернення: 28.03.2026).
9. Дригулич, С. П., Орфанова, М. М., Цайтлєр, М. Й., Дригулич, П. Г. Екологічні проблеми завершальної стадії розроблення нафтогазових родовищ на прикладі Бориславa. *Науковий вісник НЛТУ*. 2024. № 34(5). С. 41-51. URL : https://doi.org/10.36930/40340506 (дата звернення: 28.03.2026).
10. Adindu Donatus Ogbu, Williams Ozowe & Augusta Heavens Ikevuje. Data science's pivotal role in enhancing oil recovery methods while minimizing environmental footprints: An insightful review. *Computer Science & IT Research Journal*, 2024. Volume 5, Issue 7. P. 1621-1633. URL: https://surl.li/uunamv (дата звернення: 28.03.2026).
11. Yatsyshyn, T. M., Lyakh, M. M., Orfanova, M. M., Glibovytska, N. I., Gavryliv, S.Yu., Lyakh, V-D. M. Decisions to prevent pollution and restore the environment within the impact of abandoned oil and gas wells : *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (EES)*. 2022. Article number 1049. 012017. URL: https://doi.org/10.1088/1755-1315/1049/1/012017 (дата звернення: 28.03.2026).
12. Глібовицька, Н. І., Плаксій, Л. В. Характеристика типів бурових розчинів та їх дія на рослини. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2020. № 2(22). С 41-47. URL: https://surli.cc/risuuh. (дата звернення: 28.03.2026).
13. Яцишин, Т. М., Глібовицька, Н. І. (2016). Вплив нафтогазовидобутку на довкілля і перспективи фітоіндикації та фіторемедіації техногеннотрансформованих територій. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. №1 (13). С 22-29. URL : https://surl.li/hqlcjj (дата звернення: 28.03.2026).
14. Аблєєва, І. Ю., Бартош, Е. Ю., Боруха, О. Р. Інноваційні підходи до утилізації бурових стічних вод. *Ecology, environmental protection and balanced environmental management: education – science – production – 2020* : зб. тез доповідей XXIII Міжнар. конф., 17-18 груд. 2020 р. Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2020. С. 15-17. ULR: https://surl.li/xxrikq (дата звернення: 28.03.2026).
15. Рикусова, Н. І., Шестопалов, О. В. Поводження з відходами буріння. URL: https://surl.li/edlijy (дата звернення: 28.03.2026).
16. Рикусова, Н. І. Вплив на навколишнє природне середовище (НПС) бурових робіт та відходів буріння нафтогазових свердловин. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси*. 2017. Том 20. С. 98-102. URL: http://mtsc.khpi.edu.ua/article/view/109628 (дата звернення: 28.03.2026).
17. Мельник, О. Д., Пукіш, А. В. Дослідження процесу коагуляції в технології очищення бурових стічних вод. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ.* 2010. № 2(35). С. 125-128. URL: https://surl.li/epuhmb (дата звернення: 28.03.2026).
18. An efficient polysilicate aluminum ferric (PSAF) for drilling wastewater treatment : Performance evaluation and coagulation mechanisms. Huihui Zhang, Qiang Li, Futang Hu, Changkun Cheng, Nan Su, Zhiyong Zhang, Zhongzhi Zhang, Yijing Luo, Heming Wang. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2025. Vol. 13, Is. 5, 118387. URL: https://surl.li/klrklp (дата звернення: 28.03.2026).
19. Ігнатов, А. О., Павличенко, А. В., & Аскеров, І. К. Еколого-технологічні складові процесу спорудження та експлуатації видобувних свердловин. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 2025. №(80), 248-261. URL: https://doi.org/10.33271/crpnmu/80.248 (дата звернення: 28.03.2026).
20. Дригулич С. П., Орфанова М. М., Дригулич П. Г. Водокористування на об’єктах видобування вуглеводнів та проблемні аспекти при оформленні дозвільної документації. *Водопостачання і водовідведення: проектування, будівництво, експлуатація, моніторинг* / за ред. проф. Мальованого М. С. Київ, 2025. С. 64-84.) URL: https://doi.org/10.56287/8285-49-4. (дата звернення: 28.03.2026).
21. Дригулич П. Г. Управління відходами буріння: проблема чи можливість? *SUSTAINABILITY LEADER'S GUIDE*. 2023. № 4 (4). С.47-58. URL: http://surl.li/hzivot (дата звернення: 28.03.2026).
22. Про управління відходами : Закон України від 20 червн. 2022 р. № 2320-IX. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text (дата звернення: 28.03.2026).
23. Про затвердження Порядку класифікації відходів та Національного переліку відходів : Постанова КМУ від 20 жовт. 2023 р. № 1102. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1102-2023-%D0%BF#Text (дата звернення: 28.03.2026).
24. Дригулич П. Які можливі рішення для утилізації бурових стічних вод (БСВ)? *Офіс сталих рішень* : веб-сайт. URL: https://surl.li/bcwwoe (дата звернення: 28.03.2026).
25. Дригулич П. Г.. Управління відходами буріння: проблема чи можливість? *Офіс сталих рішень* : веб-сайт. URL: https://surl.li/rnrpfv (дата звернення: 28.03.2026).
26. Який метод очищення стічних вод необхідно застосовувати на підприємстві? *ECOBUSINESS. Екологія підприємства*. 2022. №4. URL: https://surl.lu/qnqtrg (дата звернення: 28.03.2026).
27. Карабин В. В. Заходи мінімізації ризиків виникнення надзвичайних ситуацій екологічної генези на ділянках будівництва нафтогазових свердловин. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2018. № 11(28). С. 68–70. URL: https://doi.org/10.15421/40281113 (дата звернення: 28.03.2026).
28. ГСТУ 41-00032626-00-007-97. Охорона довкілля. Споруджування розвідувальних і експлуатаційних свердловин на нафту та газ на суші. Правила проведення робіт. [Чинний від 1998-04-13]. Київ, 1998. 80 с. URL: http://surl.li/ngmdfm (дата звернення: 28.03.2026).

29. Водний Кодекс України : Закон України від 06 червн. 1995 р. № 213/95-ВР. *Відомості Верховної Ради України* (ВВР), 1995, № 24, ст. 189. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80#Text (дата звернення: 28.03.2026).
30. Про затвердження Методики визначення розмірів шкоди, зумовленої забрудненням і засміченням земельних ресурсів через порушення природоохоронного законодавства : Наказ Міністерства охорони навколишнього природного середовища від 27 жовт. 1997 р. № 171. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0285-98#Text (дата звернення: 28.03.2026).
31. Про затвердження Правил приймання стічних вод до систем централізованого водовідведення та Порядок визначення розміру плати, що справляється за понаднормативні скиди стічних вод до систем централізованого водовідведення : Наказ Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури від 13 груд. 2023 р. № 1134. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0056-18#Text (дата звернення: 28.03.2026).
32. ГСТУ 41-00032626-00-023-2000. Охорона довкілля. Рекультивація земель під час спорудження нафтових і газових свердловин. Київ, 2000. 69 с.
33. Про стандартизацію : Закон України 11 лют. 2014 р. № 1315. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1315-18#Text (дата звернення: 28.03.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 13.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 628.4:620.9:662.6/.9:504.06
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.45

ЦИРКУЛЯРНЕ УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ: МЕТОДОЛОГІЯ ІНТЕГРАЦІЇ БІОЕНЕРГЕТИКИ ТА ТЕХНОЛОГІЙ РЕКУПЕРАЦІЇ

Криштоп Є.А.
Державний біотехнологічний університет
вул. Алчевських, 44, 61002, м. Харків
kafagroeco@ukr.net

У статті обґрунтовано методологічні засади циркулярного управління відходами в контексті інтеграції біоенергетичних технологій і рекуперації ресурсів. Актуальність дослідження зумовлена фрагментарністю існуючих підходів до переробки відходів, методологічною неузгодженістю між екологічними, технологічними та управлінськими вимірами, а також відсутністю цілісного кількісного інструментарію для підтримки стратегічних рішень. Узагальнено підходи до циркулярного управління відходами; запропоновано розгляд відходів як вторинних ресурсів, що генерують матеріальні, енергетичні та соціально-економічні вигоди.

Розроблено інтегральний індекс циркулярності системи управління відходами (ІЦС), що об'єднує матеріальний та енергетичний виміри рекуперації в єдиний безрозмірний показник і слугує інструментом порівняння технологічних сценаріїв. Аналітична логіка методології реалізується як послідовність: ідентифікація потоків відходів – вибір технологій – розрахунок ІЦС – інтерпретація результатів – зворотний зв'язок для коригування стратегії управління. Проведено порівняльний аналіз ключових технологій – анаеробного зброджування, піролізу, газифікації, компостування та спалювання з рекуперацією тепла – за критеріями умов застосування, екологічної доцільності та умовних значень ІЦС. Демонстраційний розрахунок для умовного муніципального потоку органічних відходів обсягом 10 000 т/рік показав, що поєднання анаеробного зброджування і компостування підвищує ІЦС з 0,00 до 0,45–0,62 залежно від вагових коефіцієнтів та забезпечує скорочення викидів парникових газів приблизно на 2 200 т CO_2-екв./рік. Перехід до циркулярної моделі розглядається як формування адаптивної системи управління зі зворотними зв'язками, що узгоджує технологічні, економічні та регуляторні механізми.

Запропонований підхід узгоджується з міжнародними рекомендаціями UNECE/OECD щодо вимірювання циркулярної економіки та може застосовуватися в екологічному управлінні, стратегічному плануванні й оцінці технологічних сценаріїв на муніципальному та регіональному рівнях. *Ключові слова:* циркулярна економіка, системи управління відходами, біоенергетика, рекуперація ресурсів, індекс циркулярності (ІЦС), анаеробне зброджування, піроліз, стратегічне екологічне планування

Circular Waste Management: Methodology for Integrating Bioenergy and Resource Recovery Technologies. Kryshtop Ye.

This study develops the methodological foundations of circular waste management in the context of integrating bioenergy technologies and resource recovery. The need for a coherent methodology arises from the fragmentation of existing approaches to waste treatment, the lack of methodological alignment between environmental, technological, and managerial dimensions, and the absence of integrated quantitative tools for strategic decision support. Existing approaches to circular waste management are synthesised and waste is conceptualised as a secondary resource capable of generating material, energy, and socio-economic benefits.

An integral circularity index for waste management systems (CIWMS) is proposed, combining material and energy recovery dimensions into a single dimensionless indicator that serves as a tool for comparing technological scenarios. The analytical logic of the methodology is structured as a sequence: waste flow identification – technology selection – CIWMS calculation – results interpretation – feedback for management strategy adjustment. A comparative analysis of key technologies – anaerobic digestion, pyrolysis, gasification, composting, and incineration with heat recovery – is conducted against criteria of application conditions, environmental feasibility, and indicative CIWMS values. A demonstration calculation for a hypothetical municipal organic waste flow of 10,000 t/year shows that the combination of anaerobic digestion and composting increases the CIWMS from 0.00 to 0.45–0.62 depending on weighting coefficients and reduces greenhouse gas emissions by approximately 2,200 t CO_2-eq./year. The transition to a circular model is framed as the development of an adaptive management system with feedback mechanisms that align technological, economic, and regulatory dimensions.

The proposed approach is consistent with UNECE/OECD guidelines on measuring the circular economy and is applicable to environmental management, strategic planning, and the evaluation of technological scenarios at the municipal and regional levels. *Key words:* circular economy, waste management systems, bioenergy, resource recovery, circularity index (CIWMS), anaerobic digestion, pyrolysis, strategic environmental planning

Постановка проблеми. У сучасних умовах загострення проблеми поводження з твердими побутовими та промисловими відходами питання переходу до циркулярної моделі управління набуває стратегічного значення. За оцінками Світового банку, у 2020 році у світі було утворено близько 2,2 млрд т твердих побутових відходів, і до 2050 року цей показник може зрости до 3,88 млрд т, причому понад 70 % відходів і надалі спрямовується на полігони [1].

© Криштоп Є.А., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

В Україні ситуація є більш проблемною: відповідно до Національного плану управління відходами до 2033 року, понад 90 % побутових відходів підлягає захороненню, тоді як рівень їх утилізації та енергетичного використання суттєво відстає від практик ЄС, де пріоритет надається переробленню та енергетичному відновленню відходів [2].

Попри активне поширення концепції циркулярної економіки, підходи до інтеграції біоенергетики та технологій рекуперації у системи управління відходами залишаються неоднорідними та фрагментарними. Це обмежує можливості формування замкнених циклів ресурсокористування, ускладнює порівнюваність результатів оцінювання та знижує ефективність екологічного обліку і стратегічного планування.

Особливої складності проблема набуває для органічних і змішаних потоків відходів, де поєднання матеріального відновлення та енергетичного використання не завжди піддається одночасній оптимізації. За відсутності узгодженої методологічної основи та кількісного інструментарію існує ризик зведення циркулярності до окремих технологічних рішень, що не відображають системного характеру функціонування систем управління відходами.

Актуальність дослідження. Актуальність зумовлена необхідністю формування узгодженого методологічного підходу до аналізу циркулярного управління відходами в умовах інтеграції біоенергетики та технологій рекуперації. Посилення екологічних ризиків, зміна клімату, виснаження ресурсів і зростання запиту на сталий розвиток обумовлюють обмеженість традиційних лінійних моделей поводження з відходами [3].

Сучасні дослідження свідчать, що ключовою перешкодою впровадження принципів циркулярної економіки є не дефіцит технологій, а методологічна неузгодженість між екологічними, технологічними та управлінськими підходами [4]. Зокрема, Matheri et al. (2024) показали, що інтеграція цифрових моделей у системи управління органічними відходами підвищує точність прогнозування виходу біометану на 15–25 %, однак без узгодженої методологічної рамки ці результати залишаються ізольованими від процесів прийняття управлінських рішень [5]. У цьому контексті розроблення цілісної методології циркулярного управління відходами є необхідною передумовою переходу від декларативного визнання їх ресурсного потенціалу до його системної реалізації.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження спрямоване на розвиток методологічного апарату еколого-економічного аналізу циркулярної економіки, зокрема формалізацію підходів до оцінювання систем управління відходами. Запропонований підхід узгоджує теоретичні моделі з практичними завданнями природоохоронного управління, інтегруючи їх у процеси прийняття рішень.

Практичне значення полягає у застосуванні результатів при розробленні стратегічних і програмних документів, формуванні екологічної політики та просторовому плануванні. Методологія забезпечує кількісну оцінку циркулярності, обґрунтування вибору технологій і підвищення ефективності екологічного обліку. Підхід узгоджується з пріоритетами Основних засад державної екологічної політики України [6] та відповідає сучасним міжнародним підходам до вимірювання циркулярної економіки, зокрема рекомендаціям UNECE/OECD (2024), що акцентують необхідність методологічної узгодженості та формалізації процедур оцінювання [7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У науковій літературі спостерігається стійке зростання інтересу до циркулярної економіки та управління відходами [8, 9]. Водночас у наукових дослідженнях переважають описові або технологічно орієнтовані підходи, тоді як застосування формалізованих методів вибору технологій, зокрема на основі підходів Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA), залишається обмеженим [10].

Окремі роботи спрямовані на кількісне моделювання. Зокрема, Hernández-Romero et al. (2024) запропонували модель мультицільової оптимізації систем «waste-to-energy» в умовах циркулярної економіки, однак інтеграція отриманих результатів у комплексні управлінські рішення представлена обмежено [11]. Papamichael et al. (2023) систематизували індикатори циркулярності, проте їх застосування здебільшого обмежується окремими потоками без урахування міжрівневих зв'язків [12]. Спроби інтегральної оцінки залишаються обмеженими. Edirisinghe et al. (2024) запропонували підхід до оцінки фактору циркулярності для промислових зон, який не враховує енергетичні потоки та механізми зворотного зв'язку [13]. У вітчизняних дослідженнях циркулярне управління відходами розглядається переважно на рівні окремих економічних і нормативних аспектів [14], тоді як технологічні та методологічні підходи залишаються недостатньо інтегрованими, що узгоджується з міжнародними рекомендаціями у сфері вимірювання циркулярної економіки [7].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Незважаючи на розвиток методологічного апарату, у більшості досліджень відсутня узгоджена логіка переходу від ідентифікації потоків відходів до вибору технологій і подальшого використання результатів у прийнятті управлінських рішень. Обмеженим залишається також врахування зворотних зв'язків між результатами оцінювання та коригуванням стратегій управління.

Недостатньо дослідженим є інтегрування біоенергетичних і матеріальних потоків рекуперації в єдину кількісну систему оцінки циркулярності. Існуючі підходи здебільшого мають фрагментарний характер або обмежуються описовими характеристиками технологій без формалізованих критеріїв

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

вибору та інтегральних показників ефективності, що знижує їх прикладну цінність.

Таким чином, актуальним залишається розроблення підходу, який забезпечує послідовність аналітичних етапів, кількісну оцінку циркулярності та інтеграцію результатів у систему управління відходами.

Новизна. Наукова новизна дослідження полягає у розробленні методологічного підходу до циркулярного управління відходами, що, на відміну від існуючих, поєднує аналітичну логіку із зворотними зв'язками, інтегральний індикатор ІЦС та порівняльну оцінку технологій.

На відміну від підходів Edirisinghe et al. [13], де фактор циркулярності оцінюється переважно за матеріальними потоками і не охоплює енергетичного виміру, запропонований ІЦС інтегрує обидва виміри в єдиний показник. На відміну від Hernández-Romero et al. [11], запропонована методологічна рамка включає зворотні зв'язки та забезпечує інтеграцію результатів оцінювання у процеси прийняття управлінських рішень. Порівняльну характеристику підходів подано у таблиці 1.

Методологічне значення. Методологічне значення роботи полягає у формуванні узгодженої аналітичної логіки дослідження циркулярного управління відходами, що ґрунтується на чіткому розмежуванні етапів ідентифікації потоків, вибору технологій, розрахунку ІЦС та інтерпретації результатів. Такий підхід підвищує відтворюваність і порівнюваність результатів у різних наукових і прикладних контекстах.

Запропонована рамка інтегрує технологічні, економічні та управлінські виміри аналізу, не зводячи складність систем управління відходами до ізольованих показників. Це робить її застосовною не лише для біоенергетики, а й для будь-яких систем матеріальної рекуперації – у стратегічному плануванні, екологічному обліку та оцінці ризиків. Узагальнену аналітичну логіку подано на рис. 1.

Викладення основного матеріалу. Запропонована методологія ґрунтується на трактуванні відходів як вторинних ресурсів, здатних генерувати матеріальні, енергетичні та соціально-економічні вигоди. Її аналітична логіка передбачає послідовний перехід від характеристик потоків до управлінсько значущих результатів. Ключовою відмінністю від описових підходів є формалізований зворотний зв'язок між блоками вибору технологій і управлінських рішень, що перетворює методологію з одноразового аналітичного інструменту на механізм адаптивного управління.

Важливою методологічною передумовою є розмежування логіки дослідження та технологічних рішень, що запобігає редукції складних взаємодій у системах управління відходами до суто технічних параметрів і забезпечує коректну інтерпретацію результатів у природоохоронному контексті. Запропонований підхід реалізується як послідовність етапів: ідентифікація потоків → вибір технологій → розрахунок ІЦС → інтерпретація результатів → зворотний зв'язок (рис. 1).

Центральним кількісним елементом запропонованої методології є інтегральний індекс циркулярності системи управління відходами (ІЦС), що визначається за формулою (1):

$$ІЦС = \alpha \cdot (R_m / W) + \beta \cdot (R_e / E_{max}) - \gamma \cdot (D / W) \quad (1)$$

де усі компоненти індексу є нормованими безрозмірними величинами; R_m – маса матеріально рекуперованих ресурсів (digestate, компост, біовугілля), т/рік; W – загальний обсяг вхідних відходів, т/рік; R_e – обсяг виробленої відновлюваної енергії, кВт·год/рік; E_{max} – теоретично максимальний енергетичний потенціал потоку відходів, кВт·год/рік; D – обсяг відходів, що спрямовані на захоронення, т/рік; α, β, γ – вагові коефіцієнти відповідно матеріального відновлення, енергетичного відновлення та штрафу за захоронення.

Симетрична адитивна форма рівняння усуває асиметрію попередньої версії, у якій D фігурував лише в енергетичному доданку. За умовчанням

Таблиця 1

Порівняльна характеристика запропонованого підходу та існуючих методологій

Критерій	Існуючі підходи	Запропонована рамка
Аналітична логіка	Фрагментарна: технологія → результат	Поетапна: потоки → технологія → ІЦС → рішення
Зворотні зв'язки	Відсутні або не формалізовані	Включені як елемент адаптивного управління
Кількісний індикатор	Окремі показники (вихід газу, ефективність)	Інтегральний індекс циркулярності ІЦС [0; 1]
Тип оцінки	Переважно технологічна або вартісна	Комбінована: матеріальна + енергетична + соціальна
Охоплення потоків	Матеріальний АБО енергетичний	Інтегроване (матеріальний + енергетичний + нутрієнтний)
Зв'язок з управлінням	Декларативний	Формалізований через ІЦС та ієрархію рішень

Примітка: узагальнення існуючих підходів виконано на основі аналізу літературних джерел [10–13].

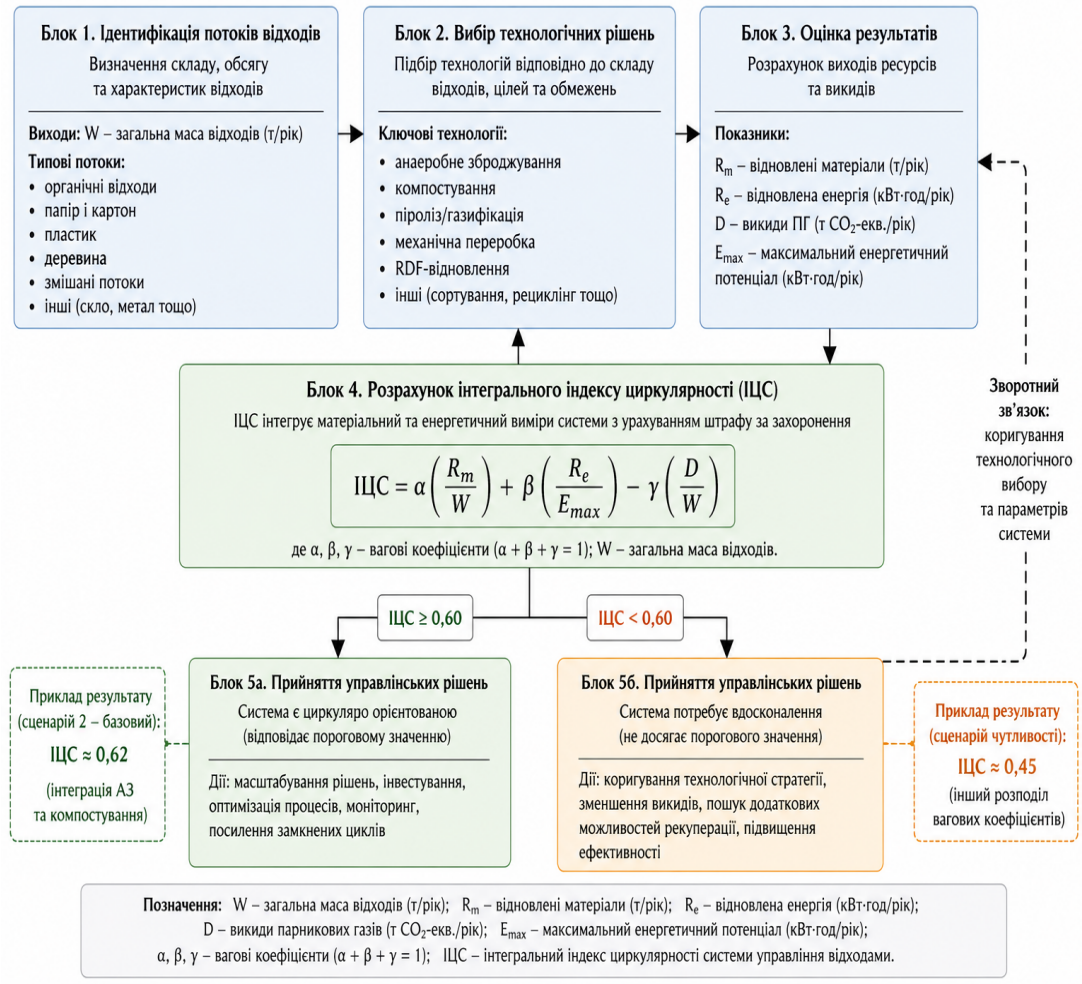


Рис. 1. Аналітична модель циркулярного управління відходами із зворотними зв'язками (розроблено автором)

$\alpha = \beta = \gamma = 1/3$, що рівномірно розподіляє внески всіх трьох компонентів. Калібрування коефіцієнтів рекомендується здійснювати через сценарний аналіз або на підставі регіональних пріоритетів управління відходами [7, 16].

Значення, як правило, знаходиться в діапазоні [0; 1], де 0 відповідає повністю лінійній системі (усі відходи на полігоні), а 1 – ідеальній циркулярній системі (нульове захоронення, повна рекуперація матеріалів і енергії). Порогове значення для кваліфікації системи як «циркулярно орієнтованої» умовно встановлюється на рівні ІЦС $\geq$ 0,60, що корелює з цілями ЄС щодо перенаправлення не менше 60 % органічних відходів від полігонів [3]. Порогове значення є евристичним орієнтиром і може варіювати залежно від регіонального контексту, типу потоків відходів та національних стратегічних цілей [7, 16]. Якщо за результатами моніторингу ІЦС опускається нижче порогу, механізм зворотного зв'язку передбачає повернення до блоку вибору технологій і коригування стратегії (рис. 1).

Вибір технологій є ключовим аналітичним кроком, оскільки перелік доцільних рішень принципово залежить від морфологічного складу відходів, наявності інфраструктури та управлінських пріоритетів – механічне перенесення узагальнених схем без урахування регіональної специфіки знижує аналітичну релевантність результатів [16]. Аналітичну порівняльну характеристику основних технологій за критеріями умов застосування, екологічної доцільності та умовних значень ІЦС подано у таблиці 2.

З таблиці 2 видно, що найвищі значення ІЦС забезпечує анаеробне зброджування (0,75–0,90), оскільки воно одночасно вирішує завдання матеріальної рекуперації (digestate, рекуперація P та N) та енергетичного відновлення (біогаз). Спалювання з рекуперацією тепла, незважаючи на поширеність, характеризується найнижчими значеннями ІЦС (0,25–0,40) через відсутність матеріальних потоків рекуперації та проблему золи. Це відповідає принципу EU Waste Hierarchy щодо пріоритетності матеріального відновлення перед енергетичним використанням [3].

На етапі ідентифікації потоків відходів доцільно використовувати міжнародні класифікаційні рамки як інструменти структуризації дослідження. У запропонованій методологічній логіці такі рамки застосову-

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

Таблиця 2

Аналітична порівняльна характеристика технологій біоенергетики та рекуперації у системі циркулярного управління відходами

Технологія	Вхідний матеріал	Основний продукт	Умови застосування	Екологічна доцільність	ІЦС (умовн.)
Анаеробне зброджування	Органічні відходи, мул, гній	Біогаз (60–70 % CH_4), digestate	Вологість >60%, вміст ОР >30%	Висока: рекуперація C, N, P; зниження GHG	0,75–0,90
Піроліз	Деревні, с/г відходи, осад стічних вод	Біовугілля, піролізний газ, смоли	Вологість <15%, термостійка фракція	Висока: секвестрація вуглецю, поліпшення ґрунту	0,60–0,80
Газифікація	ТПВ, тверда біомаса	Синтез-газ (H_2 + CO)	Низька вологість, однорідний склад	Середня: потребує очищення газу від смол	0,50–0,70
Компостування	Харчові, рослинні відходи	Компост (гумус, NPK)	Аеробні умови, C/N = 25–35	Висока: повернення нутрієнтів у ґрунт	0,65–0,80
Спалювання + рекуперація тепла	Змішані ТПВ (залишки після сортування)	Електро-/ теплоенергія	Лише після вилучення вторсировини	Низька (фінальна стадія): золова проблема	0,25–0,40

Примітка: значення ІЦС наведено як орієнтовні на основі узагальнення літературних джерел щодо показників матеріальної та енергетичної ефективності та індикаторів циркулярності технологій управління відходами [11–13] і використовуються для порівняльного аналізу.

ються не як універсальні схеми, а як аналітичні орієнтири, що забезпечують термінологічну узгодженість і порівнюваність результатів. Взаємодоповнювальні функції міжнародних рамок у запропонованому підході систематизовано у таблиці 3.

Формування системи показників є ключовим етапом переходу від якісної ідентифікації до подальшого аналізу. Методологічно доцільним є розмежування технологічних показників (ефективність конверсії, вихід продукту, питомі викиди) та соціально-економічних індикаторів (вартість рекуперованих ресурсів, скорочення витрат на полігонування, соціальні вигоди від зниження GHG). Ключовим синтетичним показником виступає розрахований ІЦС, що інтегрує матеріальний та енергетичний виміри в єдиний інтегральний індикатор.

Для ілюстрації прикладного використання запропонованого підходу наведемо демонстраційний розрахунок для умовного муніципального потоку органічних відходів обсягом 10 000 т/рік (таблиця 4). Розглядаються три сценарії: базовий (захоронення на полігоні), комбінований АЗ + компостування та АЗ + піроліз.

У таблиці 4 наведено результати для сценарію 2 (зважені коефіцієнти), тоді як сценарій 1 використовується для ілюстрації чутливості ІЦС до вибору вагових параметрів. Розрахунок для сценарію «АЗ + компост» за двома наборами коефіцієнтів: Сценарій 1 (рівні ваги, $\alpha=\beta=\gamma=1/3$): ІЦС = 0,217 + 0,250 − 0,017 ≈ 0,45. Сценарій 2 (пріоритет матеріального відновлення, $\alpha=0,5$; $\beta=0,4$; $\gamma=0,1$): ІЦС = 0,325 + 0,300 − 0,005 ≈ 0,62.

Отримані значення показують, що за рівних ваг (сценарій 1) система не досягає порогу циркулярності (ІЦС ≈ 0,45 < 0,60), тоді як за пріоритизації матеріального відновлення (сценарій 2) ІЦС зростає до ≈ 0,62 і система переходить у категорію «циркулярно орієнтованої».

Таблиця 3

Роль міжнародних методологічних рамок у дослідженні циркулярного управління відходами

Методологічна рамка	Основна функція	Роль у запропонованому підході
Waste Hierarchy (EU Dir. 2008/98)	Концептуальна	Визначення пріоритетності методів: запобігання → повторне використання → рециклінг → відновлення → знешкодження
European Waste Catalogue	Класифікаційна	Структурована ідентифікація потоків відходів на етапі входу
MFA (Material Flow Analysis)	Аналітична	Кількісна оцінка матеріальних і енергетичних потоків для розрахунку R_m та R_e у формулі (1)
LCA (Life Cycle Assessment)	Оціночна	Оцінка екологічного навантаження технологій по всьому ЖЦ; верифікація значень ІЦС

Таблиця 4

Демонстраційний розрахунок ІЦС для умовного потоку органічних відходів (W = 10 000 т/рік)

Показник	Полігон (базовий)	АЗ + компост	АЗ + піроліз	Примітка
Обсяг органічних відходів (W), т/рік	10 000	10 000	10 000	Вхідний потік
Маса матеріальної рекуперації (R_m), т/рік	0	6 500	5 500	digestate + компост / біовугілля
Частка рекуперованих матеріалів (R_m/W)	0	0,65	0,55	безрозмірна величина
Вироблена енергія (R_e), $\times 10^3$ кВт·год/рік	0	3 000	4 000	біогаз / піролізний газ
Теор. макс. потенціал (E_{max}), $\times 10^3$ кВт·год/рік	4 000	4 000	4 000	нормалізація R_e/E_{max} у формулі (1)
Відходи на захоронення (D), т/рік	10 000	500	500	залишки після переробки
ІЦС (сценарій 2: α=0,5; β=0,4; γ=0,1)	0,00	0,62	0,64	формула (1)
Скорочення GHG, тCO_2-екв./рік	—	~2 200	~1 800	порівняно з базовим

Різниця між сценаріями наочно ілюструє чутливість ІЦС до вибору коефіцієнтів і підкреслює, що без обґрунтованого калібрування α, β, γ результат може суттєво варіювати. Розрахунок є демонстраційним; верифікація вхідних даних обов'язкова для реального застосування.

Інтерпретація результатів завершує аналітичний цикл і є переходом від наукового розрахунку до прийняття рішень. Отримані значення ІЦС слід розглядати не як кінцеву відповідь, а як інформаційну основу: вони набувають управлінського сенсу лише у поєднанні з контекстом – складом відходів, регуляторним середовищем та соціальними пріоритетами.

Розмежування наукової інтерпретації (аналіз із урахуванням обмежень методів) і управлінської (використання у стратегічному плануванні, екологічному обліку, оцінці ризиків) запобігає прямому перенесенню результатів у регуляторні рішення без належного контекстуального аналізу.

Інтеграція ІЦС у DPSIR-логіку (Driving forces → Pressures → State → Impact → Response) або в ESG-звітність підприємств дозволяє пов'язати технологічні показники з ширшою системою корпоративного та державного управління, що відкриває додаткові канали для практичного застосування результатів [7, 16]. Зворотний зв'язок між блоками управлінських рішень і вибору технологій забезпечує динамічне коригування стратегії та знижує управлінську невизначеність [7, 12].

Головні висновки. У дослідженні обґрунтовано методологічний підхід до циркулярного управління відходами в контексті інтеграції біоенергетики та технологій рекуперації, що ґрунтується на поетапній аналітичній логіці із зворотними зв'язками та чіткому розмежуванні ідентифікації потоків, вибору технологій, оцінювання й інтерпретації результатів. Розроблено формулу інтегрального індексу циркулярності системи управління відходами (ІЦС), що об'єднує матеріальний і енергетичний виміри рекуперації. Демонстраційний розрахунок свідчить, що перехід від базового сценарію (полігон) до сценарію «АЗ + компостування» підвищує ІЦС з 0,00 до ≈0,62 та забезпечує скорочення GHG-емісій на ~2 200 т CO_2-екв./рік для умовного потоку 10 000 т/рік. Сценарій «АЗ + піроліз» характеризується ІЦС ≈ 0,62–0,64, що супроводжується вищим енергетичним виходом і меншими обсягами матеріальної рекуперації.

Показано, що серед розглянутих технологій анаеробне зброджування має високий потенціал циркулярності, тоді як спалювання з рекуперацією тепла характеризується найнижчими умовними значеннями ІЦС (0,25–0,40) та є виправданим лише як фінальна стадія після вичерпання інших опцій. Водночас ІЦС доцільно розглядати як аналітичний інструмент підтримки управлінських рішень, а не як самодостатню метрику.

Обмеження методології. Запропонований підхід має низку обмежень. По-перше, формула ІЦС не враховує якість рекуперованих матеріалів (зрілість компосту, вміст важких металів у digestate), що знижує точність оцінювання для специфічних потоків. По-друге, вагові коефіцієнти α, β, γ потребують калібрування на основі сценарного аналізу або регіональних пріоритетів (зокрема, за жорстких цілей декарбонізації доцільне підвищення γ відносно α і β). По-третє, демонстраційний розрахунок є умовним і не підлягає прямому перенесенню без верифікації вхідних даних. Порогове значення ІЦС ≥ 0,60 має евристичний характер і потребує нормативного уточнення в межах конкретної системи управління. Зазначені обмеження визначають напрями подальших досліджень.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати застосовні для вдосконалення

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

підходів до оцінювання систем циркулярного управління відходами, розроблення інструментів стратегічного екологічного планування та регіональних програм. Перспективні напрями охоплюють емпіричну верифікацію ІЦС на реальних системах в Україні, адаптацію підходу до моніторингу в умовах зміни клімату та розвиток методики калібрування вагових коефіцієнтів. Методологія також придатна для використання у навчальному процесі в межах дисциплін екологічного й управлінського профілю.

Література

1. Kaza S., Yao L., Bhada-Tata P., Van Woerden F. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Washington, DC: World Bank, 2018. 295 p. https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0
2. Національний план управління відходами до 2033 року : затв. розпорядженням Кабінету Міністрів України від 27 груд. 2024 р. № 1353-р. Київ, 2024. 60 с.
3. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste. Official Journal of the EU. 2008. L 312. P. 3–30. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32008L0098
4. Geissdoerfer M., Savaget P., Bocken N. M. P., Hultink E. J. The Circular Economy – A new sustainability paradigm? Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 143. P. 757–768. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048
5. Matheri A. N., Sithole Z. B., Mohamed B. Data-Driven Circular Economy of Biowaste to Bioenergy with Conventional Prediction Modelling and Machine Learning. Circular Economy and Sustainability. 2024. Vol. 4. P. 929–950. https://doi.org/10.1007/s43615-023-00329-3
6. 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
7. UNECE/OECD. Guidelines for Measuring Circular Economy. Part A: Conceptual Framework, Indicators and Measurement Framework. Geneva: UNECE, 2024. URL: https://unece.org/statistics/publications/guidelines-measuring-circular-economy-part-conceptual-framework-indicators
8. Kirchherr J., Reike D., Hekkert M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. Resources, Conservation and Recycling. 2017. Vol. 127. P. 221–232. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005
9. Chioatto E., Sospiro P. Transition from waste management to circular economy: The European Union roadmap. Environment, Development and Sustainability. 2023. Vol. 25. P. 249–276. https://doi.org/10.1007/s10668-021-02050-3
10. Figueira J., Greco S., Ehrgott M. (Eds.). Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys. New York: Springer, 2005. 1045 p.
11. Hernández-Romero I. M., Niño-Caballero J. C., González L. T. et al. Waste management optimization with NLP modeling and waste-to-energy in a circular economy. Scientific Reports. 2024. Vol. 14. 19946. https://doi.org/10.1038/s41598-024-69321-7
12. Papamichael I., Voukkali I., Zorpas A. A. Waste metrics in the framework of circular economy. Waste Management & Research. 2023. Vol. 41(12). P. 1741–1752. https://doi.org/10.1177/0734242X231190794
13. Edirisinghe L. G. L. M., de Alwis A. A. P., Wijayasundara M., Hemali N. A. Quantifying circularity factor of waste: Assessing the circular economy potential of industrial zones. Cleaner Environmental Systems. 2024. Vol. 12. 100160. https://doi.org/10.1016/j.cesys.2023.100160
14. Салашенко Т. І., Самойленко В. С. Нормативно-правове забезпечення розбудови циркулярного підходу в Україні. Бізнес Інформ. 2024. №10. С. 159–174. https://doi.org/10.32983/2222-4459-2024-10-159-174
15. Awino F. B., Apitz S. E. Solid waste management in the context of the waste hierarchy and circular economy frameworks: An international critical review. Integrated Environmental Assessment and Management. 2024. Vol. 20, No. 1. P. 9–35. https://doi.org/10.1002/ieam.4774
16. Vagiona D. G. Assessment of Circular Economy Implementation in Municipal Waste Management Through Performance Indicators and Citizens' Opinion in a City in Western Greece. Sustainability. 2025. Vol. 17, No. 5. 2265. https://doi.org/10.3390/su17052265

Дата першого надходження статті до видання: 29.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 665
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.46

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВІДХОДІВ БІОЕНЕРГЕТИЧНИХ ВИРОБНИЦТВ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ҐРУНТІВ, ЗАБРУДНЕНИХ ДИЗЕЛЬНИМ ПАЛИВОМ

Черняк Л.М.[1], **Манєцкі Томаш**[2], **Чешельскі Радослав**[2], **Дмитруха Т.І.**[1], **Мельниченко В.В.**[3], **Олександр Штика**[2], **Фролов В.Ф.**[4]
[1]Національний університет «Київський авіаційний інститут»
пр. Любомира Гузара, 1, 03058, м. Київ
[2]Лодзинський технологічний університет
вул. Стефана Жеромского ,114, 90-543 м. Лодзь, Польща
[3]ТОВ «НВП «Екозахист»
вул. Деміївська, 18 к.3, 03039, м. Київ
[4]Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, 03035, Київ
larysa.cherniak@npp.kai.edu.ua

У статті досліджено ефективність використання відходів виробництва біоенергії (дигестату) для рекультивації ґрунтів, забруднених дизельним паливом. Для дослідження було відібрано зразки ґрунту з рівнем забруднення дизельним паливом 10 ОДК та з різним вмістом дигестату для оцінки його впливу на процеси відновлення ґрунту.

Як ключові індикатори відновлення використовували зміни показника pH та активності ферменту поліфенолоксидази, який є важливим маркером біохімічної активності ґрунту та його здатності до детоксикації органічних забруднювачів. Спостереження проводили в динаміці протягом 10 діб, що дозволило простежити ранні стадії процесу самовідновлення ґрунту.

Результати показали, що внесення дигестату сприяє стабілізації pH середовища та створює більш сприятливі умови для розвитку мікробіоценозу. Найвищу активність поліфенолоксидази та найінтенсивніше відновлення біохімічних процесів зафіксовано на десяту добу експерименту при внесенні 15% дигестату у ґрунт.

Отримані результати підтверджують, що дигестат може виступати ефективним органо-мінеральним агентом для відновлення деградованих ґрунтів. Його застосування не лише сприяє зменшенню концентрації нафтопродуктів, але й активує природні механізми самоочищення екосистеми. Окремо підкреслюється значення таких підходів у контексті циркулярної економіки, оскільки відходи біоенергетичного виробництва повторно залучаються у господарський обіг замість утилізації.

Використання дигестату є перспективним напрямом екологічної рекультивації, що поєднує вирішення проблеми утилізації відходів і відновлення забруднених земель. Подальші дослідження доцільно спрямувати на довгострокову оцінку стабільності відновлених ґрунтів та вплив різних типів органічних відходів на процеси біодеградації нафтопродуктів. *Ключові слова:* нафтопродукти, відновлення ґрунтів, дигестат, поліфенолоксидаза.

Assessment of the efficiency of using bioenergy production waste for the remediation of diesel-contaminated soils. Cherniak L., Maniecki T., Ciesielski R., Dmytrukha T., Melnychenko V., Shtyka O., Frolov V.

The article investigates the effectiveness of using bioenergy production waste (digestate) for the remediation of soils contaminated with diesel fuel. Soil samples with a diesel fuel contamination level of 10 OEC and with different digestate contents were selected for the study to assess its impact on soil restoration processes.

The key restoration indicators used were changes in pH and the activity of the polyphenol oxidase enzyme, which is an important marker of the biochemical activity of the soil and its ability to detoxify organic pollutants. Observations were carried out over a period of 10 days, which allowed us to trace the early stages of the soil self-restoration process.

The results showed that the introduction of digestate helps stabilize the pH of the environment and creates more favorable conditions for the development of microbiocenosis. The highest activity of polyphenol oxidase and the most intensive restoration of biochemical processes were recorded on the tenth day of the experiment when 15% digestate was added to the soil.

The results obtained confirm that digestate can act as an effective organo-mineral agent for the restoration of degraded soils. Its use not only contributes to the reduction of the concentration of petroleum products, but also activates the natural mechanisms of self-cleaning of the ecosystem. The importance of such approaches in the context of a circular economy is particularly emphasized, since waste from bioenergy production is re-involved in economic circulation instead of disposal.

The use of digestate is a promising direction of ecological remediation, combining the solution of the problem of waste disposal and the restoration of contaminated lands. Further research should be directed to the long-term assessment of the stability of restored soils and the impact of different types of organic waste on the processes of biodegradation of petroleum products. *Key words:* petroleum products, soil remediation, digestate, polyphenol oxidase.

© Черняк Л.М., Манєцкі Томаш, Чешельскі Радослав, Дмитруха Т.І., Мельниченко В.В., Олександр Штика, Фролов В.Ф., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. Забруднення ґрунтів нафтою та нафтопродуктами є однією з найактуальніших екологічних проблем сучасності [1, 2]. Основними джерелами надходження вуглеводнів у ґрунтовий покрив є техногенні фактори, пов'язані з процесами видобування, транспортування, зберігання та переробки нафти. Значні обсяги нафтопродуктів потрапляють у ґрунт унаслідок аварійних розливів, використання паливно-мастильних матеріалів у промисловості й транспорті, розгерметизації трубопроводів, витоків із резервуарів, пошкодження технологічного обладнання, а також у складі виробничих і побутових стічних вод [3]. Тому, важливим науково-практичним завданням є пошук екологічно безпечних та доступних засобів та методів відновлення порушених внаслідок забруднення нафтопродуктами ґрунтів.

Актуальність. Забруднення ґрунтів нафтопродуктами призводить до порушення ґрунтових екосистем та призводить зниження їх здатності до самовідновлення. Найбільш небезпечними для ґрунтів є смолисто-асфальтенові компоненти нафти, які характеризуються високою хімічною стійкістю та здатністю швидко адсорбуватися ґрунтовими частинками [4, 5]. Вони утворюють гідрофобні плівки на поверхні ґрунту, що призводить до порушення фізико-хімічних властивостей, зниження повітрообміну та водопроникності, пригнічення діяльності аборигенних мікроорганізмів. Унаслідок цього відбувається ущільнення та так зване «цементування» ґрунтової маси, що негативно впливає на ріст і розвиток рослин, а також спричиняє зміну фізико-хімічних і біологічних показників ґрунту. Високі концентрації смолисто-асфальтенових речовин практично унеможливлюють процеси природного самоочищення та відновлення забруднених ґрунтів.

Одним із суттєвих антропогенних чинників деградації ґрунтів є надходження дизельного палива під час виконання сільськогосподарських, транспортних робіт та військових дій [6]. Дизельне пальне містить комплекс токсичних органічних сполук — насичені й ароматичні вуглеводні, смолисто-асфальтенові речовини та сірковмісні компоненти, які відзначаються високою стійкістю у природному середовищі. Потрапляючи в ґрунт, ці речовини порушують водно-повітряний режим, структуру та пористість, погіршують фізико-хімічні, агрофізичні й біохімічні властивості. Одночасно спостерігається пригнічення ґрунтової мікрофлори, що відіграє ключову роль у процесах природної ремедіації. Легкі фракції нафтопродуктів частково випаровуються, однак важкі компоненти тривалий час зберігаються в ґрунті, адсорбуються його частинками та поступово мігрують у глибші горизонти, формуючи осередки довготривалого забруднення.

Як показали дослідження [7, 8, 9] серед інших відомих способів відновлення ґрунту, використання дигестату, в контексті залучення відходів для біоенергетичних цілей з виробництва біогазу та в агроекологічних цілях шляхом використання дигестату як біодобрива є перспективним напрямом дослідження в контексті реалізації засад циркулярної економіки при функціонуванні агропромислових комплексів. Проте, питання науково обґрунтованого підбору кількості дигестану, у якості добрива при різних концентраціях дизельного палива у ґрунті, залишається недостатньо дослідженим і потребує подальшого вивчення.

Зв'язок автора доробку із важливими науковими та практичними завданнями. З урахуванням актуальності проблеми забруднення ґрунтів нафтопродуктами при виконанні сільськогосподарських робіт, було проаналізовано перспективи використання відходів біоенергетичних виробництв у якості добрив та визначено напрямки поєднання практичної ролі дигестату для відновлення порушених впливом дизельного палива ґрунтів та реалізації засад циркулярної економіки при використанні при функціонуванні агропромислових комплексів.

У роботі було експериментально досліджено залежність кислотності ґрунту та кислотність поліфенолоксидазної активність ґрунту з різним рівнем забруднення дизельним паливом, від кількості дигестату доданого до ґрунту.

У сучасних умовах для відновлення ґрунтів, забруднених нафтою та нафтопродуктами, широко застосовують біологічні методи ремедіації, зокрема використання дигестату. Дигестат – це комплексний біологічний продукт, що утворюється внаслідок анаеробного розкладання органічної сировини. Він містить активні мікроорганізми, ферменти та органічні сполуки, які забезпечують інтенсивну біологічну трансформацію токсичних речовин, у тому числі вуглеводнів нафти та сприяють відновленню фізико-хімічних, агроекологічних і біологічних властивостей ґрунту. Застосування дигестату покращує структуру та пористість ґрунтового покриву, активізує природні процеси самоочищення й самовідновлення.

Ефективність дигестату зумовлена його унікальним складом, що включає комплекс мікроорганізмів і ферментів, які діють узгоджено та взаємно підсилюють один одного. У його складі наявні бактерії та гриби-деструктори, а також ферменти, що каталізують біологічну деградацію нафтопродуктів. Зокрема, оксидази та гідролази беруть участь у розщепленні важких вуглеводнів, а пероксидази – в окисненні складних органічних сполук. У результаті відбувається інтенсифікація процесів біодеградації нафтових забруднювачів і зниження їх токсичності.

Тривале застосування дигестату сприяє покращенню структурного стану ґрунту, підвищенню його водопроникності, аерації та біологічної активності, а також розвитку корисної мікрофлори. Мікроорганізми дигестату здійснюють біотрансформацію вуглеводнів, включаючи ароматичні та

поліциклічні сполуки, які є найбільш стійкими до розкладання. У процесі біохімічних перетворень ці речовини окиснюються та мінералізуються до простих неорганічних продуктів – вуглекислого газу, води та мінеральних солей.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Незважаючи на наявність значної кількості досліджень та публікацій стосовно відновлення ґрунтів від забруднення нафтопродуктами, питання використання відходів біоенергетичних виробництв для відновлення порушених ґрунтів залишається недостатньо вивченим. Бракує практичних рекомендацій щодо оптимальної кількості дигестату у ґрунті, здатного ефективно відновлювати ґрунт, забруднений дизельним паливом.

Новизна. Новизна даної роботи полягає у визначенні впливу додавання дигестату на здатність ґрунту, забрудненого дизельним паливом, до самовідновлення. А також у розробці рекомендацій щодо використання відходів біоенергетичних виробництв, використання яких дозволить вирішити питання відновлення ґрунтів забруднених дизельним паливом.

Методологічне або загальнонаукове значення. Дослідження потенціалу дигестату при застосуванні у технологіях відновлення ґрунтів, забруднених нафтопродуктами має важливе значення для забезпечення стійкого розвитку агропромислових комплексів. Зокрема через застосування принципів циркулярної економіки при використанні відходів власних біоенергетичних виробництв для відновлення ґрунтів, порушених впливом дизельного палива. Отримані результати можуть стати основою для розробки та впровадження рекомендацій та рішень щодо підвищення рівня екологічної безпеки ґрунтів даних підприємств.

Виклад основного матеріалу. Важливим показником стану ґрунту в процесі його відновлення є кислотність (pH) [10], яка визначає характер хімічних процесів і активність мікроорганізмів-деструкторів. Більшість мікроорганізмів, що окиснюють нафтові вуглеводні, проявляють максимальну активність у слабокислому або нейтральному середовищі (pH 6,5–7,5). За умов підвищеної кислотності або лужності їхня активність різко знижується, що призводить до уповільнення процесів біодеградації.

Встановлено, що важливою умовою ефективної біодеградації нафти є забезпеченість ґрунту доступними формами елементів мінерального живлення. Відомо, що у кислих ґрунтах фосфор переходить у малодоступні сполуки, що обмежує мінеральне живлення мікроорганізмів і, відповідно, сповільнює процеси розкладання вуглеводнів.

В умовах забруднення ґрунтів нафтою та нафтопродуктами активність поліфенолоксидази, як правило, знижується через токсичний вплив вуглеводнів на мікробну спільноту. Під час біоремедіації застосування біопрепаратів і мінеральних добрив сприяє відновленню ферментативної активності ґрунту [11].

В процесі відновлення забруднених ґрунтів спостерігається поступове підвищення активності поліфенолоксидази, що свідчить про присутність значної кількості функціонально активних мікроорганізмів та відновлення процесів біоремедіації.

Матеріали та методи дослідження

1. Підготовка ґрунтових зразків.

Для проведення експерименту використовували ґрунт, який попередньо доводили до повітряно-сухого стану, подрібнювали та просіювали. Після цього зразки зважували та розподіляли у чашки Петрі рівними наважками.

Було сформовано наступні зразки ґрунту для дослідження:

- контроль (ґрунт без додавання дигестату);
- ґрунт + 10% дигестату;
- ґрунт + 15% дигестату;
- ґрунт + 20% дигестату;
- ґрунт, забруднений паливом (10 ОДК), + 10% дигестату;
- ґрунт, забруднений паливом (10 ОДК), + 15% дигестату;
- ґрунт, забруднений паливом (10 ОДК), + 20% дигестату.

Дигестат вносили у відсотковому співвідношенні до маси ґрунту. Забруднення паливом моделювали шляхом внесення полютанту до рівня 10 ОДК.

Визначення кислотності (pH)

Визначення pH ґрунту проводили потенціометричним методом у водній витяжці відповідно до міжнародного стандарту ISO 10390:2021.

Згідно з методикою, наважку ґрунту масою 10 г поміщали у конічну колбу об'ємом 250 мл та додавали 50 мл дистильованої води (співвідношення ґрунт : вода – 1:5). Отриману суспензію інтенсивно перемішували протягом 5 хвилин і фільтрували через складчастий паперовий фільтр до отримання прозорого фільтрату.

Визначення pH здійснювали за допомогою каліброваного pH-метра зі скляним електродом.

Метод ґрунтується на вимірюванні pH у водній суспензії зі співвідношенням 1:5, що є стандартним підходом для різних типів ґрунтів .

Результати вимірювань заносили до таблиці 1. Дослідження проводили у динаміці: на 1-й (початковий стан), 10-й та 20-й день експерименту.

2. Визначення поліфенолоксидазної активності ґрунту.

Поліфенолоксидазну активність ґрунту визначали як показник біохімічної активності та інтенсивності окисно-відновних процесів у ґрунтовому середовищі. Дослідження проводили для всіх варіантів зразків перед початком експерименту (1-й день), а також у динаміці – на 10-й та 20-й день.

Визначення поліфенолоксидазної активності здійснювали спектрофотометричним методом за

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

швидкістю окиснення фенольного субстрату з утворенням забарвлених продуктів реакції. Для цього наважку ґрунту інкубували з відповідним субстратом у буферному розчині за контрольованих умов, після чого вимірювали оптичну густину розчину за допомогою спектрофотометра.

Активність ферменту виражали у відносних одиницях або в мг окисненого субстрату на 1 г ґрунту за одиницю часу.

Методика визначення ґрунтових оксидаз відповідає загальноприйнятим підходам до оцінки ферментативної активності ґрунтів, описаним у міжнародних рекомендаціях з аналізу біологічних властивостей ґрунту (ISO 20130:2018).

Отримані результати представлені на графіках 1-2.

Поступове зниження кислотності ґрунту (тобто підвищення значення pH) у незабруднених паливом зразках на 10-ту та 20-ту добу, порівняно з контролем, ймовірно зумовлене активізацією мікробіологічних процесів та мінералізацією органічної речовини. У процесі розкладу органічних компонентів, зокрема за участю ґрунтової мікробіоти, відбувається утворення сполук лужного характеру (наприклад, амонійних форм азоту), що сприяє нейтралізації кислотності ґрунтового середовища. Крім того, можливим фактором є буферна здатність ґрунту, яка проявляється у стабілізації реакції середовища за рахунок катіонного обміну та зв'язування водневих іонів.

Водночас встановлено, що забруднення ґрунту дизельним паливом (ДП) у концентрації 10 ОДК не спричинило суттєвих змін кислотності. Це може свідчити про те, що вказаний рівень забруднення є недостатнім для істотного порушення кислотно-лужної рівноваги ґрунтової системи, або ж вплив вуглеводнів дизельного палива має переважно фізико-хімічний характер (наприклад, гідрофобізація частинок ґрунту), без значного утворення кислотних або лужних продуктів трансформації на початкових етапах експерименту.

Винятком є варіант із внесенням 20% дигестату, де зафіксовано підвищення кислотності (зниження pH) порівняно з аналогічним зразком без дизельного палива. Це явище можна пояснити інтенсифікацією біохімічних процесів за рахунок додаткового надходження легкодоступних органічних речовин та мікроорганізмів із дигестату. У процесі їх розкладу можуть утворюватися органічні кислоти (наприклад, оцтова, масляна), що тимчасово знижує pH середовища. Крім того, взаємодія компонентів дигестату з вуглеводнями дизельного палива може змінювати напрям мікробіологічних процесів у бік кислотогенезу.

Таким чином, отримані результати свідчать про складний характер впливу як органічних добрив (дигестату), так і нафтопродуктів на кислотно-лужний стан ґрунту, який визначається балансом мікробіологічних і фізико-хімічних процесів у системі.

Аналізую результати експериментальних досліджень, представлені на рис 2. можемо зробити наступні висновки. Зростання поліфенолоксидазної активності на 10-ту добу для всіх зразків ґрунту свідчить про швидку реакцію ґрунтової мікробіоти на зміну умов середовища. Поліфенолоксидази беруть участь у процесах окиснення фенольних сполук і є важливими індикаторами інтенсивності гуміфікації та трансформації органічної речовини. Підвищення їх активності, ймовірно, пов'язане з надходженням доступних органічних субстратів (зокрема з дигестату) та адаптацією мікроорганізмів до присутності вуглеводнів дизельного палива, що

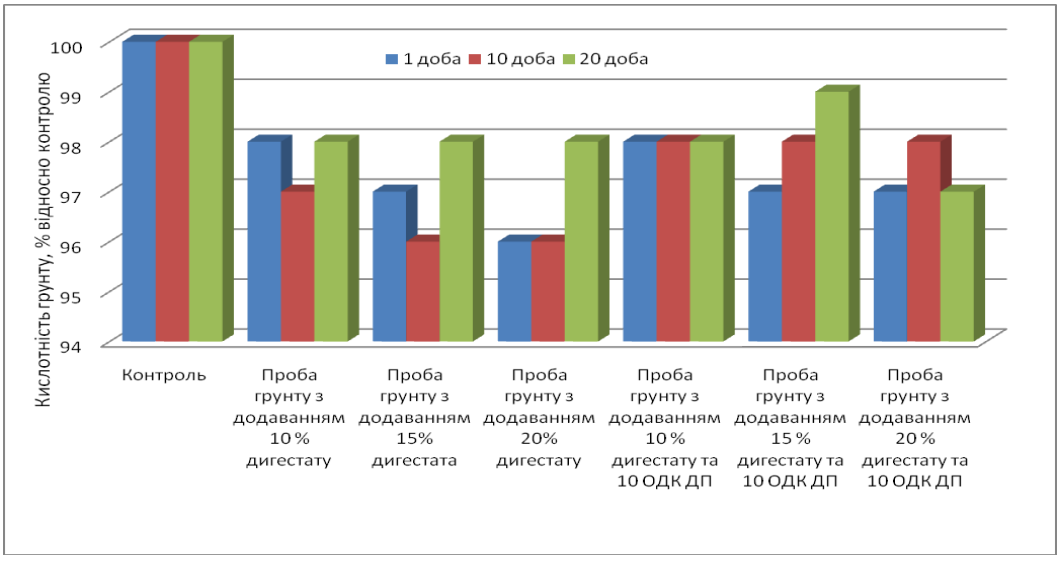


Рис. 1. Залежність кислотності ґрунту від вмісту дигестату

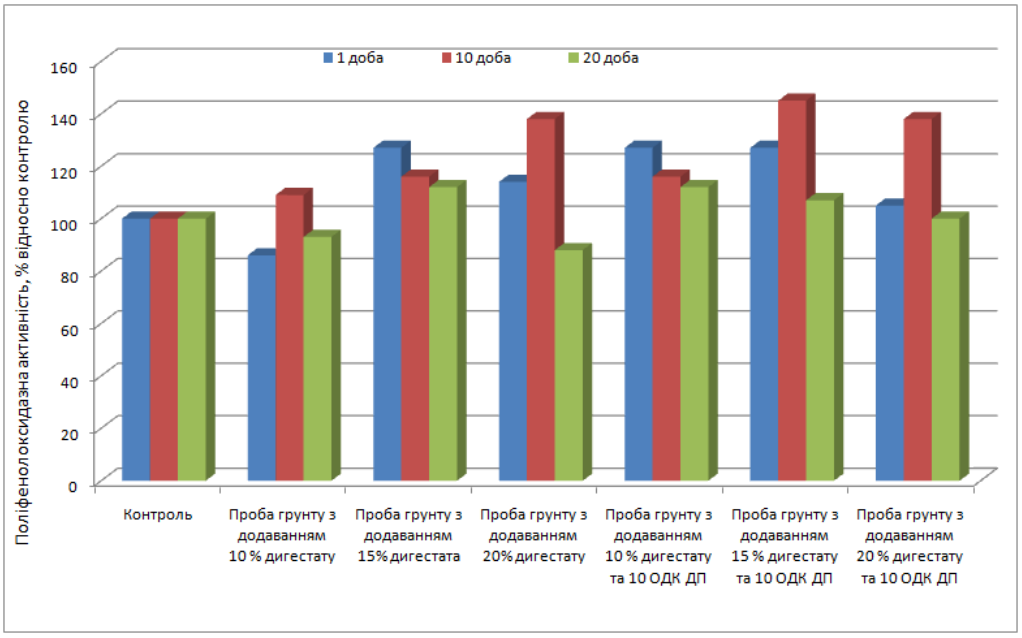


Рис. 2. Залежність поліфенолоксидазної активності ґрунту від вмісту дигестату

стимулює ферментативні процеси окиснювального типу.

Найвище значення ферментативної активності у варіанті з внесенням 15% дигестату та забрудненням 10 ОДК ДП можна пояснити синергетичним ефектом. З одного боку, дигестат є джерелом легкодоступних поживних речовин, мікроелементів і активної мікробіоти, що стимулює розвиток ферментативної системи ґрунту. З іншого боку, наявність дизельного палива у помірній концентрації може виступати як індуктор окиснювальних ферментів, оскільки мікроорганізми активізують механізми детоксикації та біодеградації вуглеводнів. У результаті відбувається підсилення активності поліфенолоксидаз.

Зниження поліфенолоксидазної активності на 20-ту добу для більшості зразків ґрунту може бути зумовлене виснаженням легкодоступних субстратів, накопиченням проміжних продуктів метаболізму або частковим пригніченням мікробіоти внаслідок тривалого впливу забруднювача. Крім того, після початкової фази активізації мікробних процесів система переходить у більш стабілізований стан, що супроводжується зниженням інтенсивності ферментативної активності.

Виняток становить варіант із додаванням 10% дигестату, де активність ферменту не знижується. Це може бути пов'язано з оптимальним співвідношенням поживних речовин і відсутністю надлишкового органічного навантаження, що забезпечує більш тривале підтримання мікробіологічної активності. Така доза дигестату, ймовірно, створює сприятливі умови для функціонування мікробних угруповань без розвитку інгібуючих ефектів, що спостерігаються при вищих концентраціях.

Отже, отримані результати демонструють, що поліфенолоксидазна активність ґрунту визначається балансом між наявністю органічних субстратів, рівнем техногенного навантаження та адаптаційними можливостями ґрунтової мікробіоти, а внесення дигестату може як стимулювати, так і стабілізувати ферментативні процеси залежно від його концентрації.

Висновки. У роботі експериментально підтверджено ефективність використання відходів біоенергетичного виробництва (дигестату) для відновлення ґрунтів, забруднених дизельним паливом, на рівні 10 ОДК.

Встановлено, що внесення дигестату суттєво впливає на фізико-хімічні та біохімічні властивості ґрунту, зокрема на значення pH та активність поліфенолоксидази, які є показниками процесів відновлення.

Доведено, що використання дигестату сприяє підвищенню здатності ґрунту до самовідновлення, активуючи біохімічні процеси в забрудненому середовищі.

Визначено оптимальний вміст дигестату – 15% від маси ґрунту, при якому спостерігається максимальний ефект відновлення, особливо на 10-й день експерименту.

Отримані результати підтверджують доцільність використання дигестату як ефективного та екологічно безпечного засобу ремедіації ґрунтів у рамках принципів циркулярної економіки, що сприяє підвищенню рівня екологічної безпеки та сталому управлінню ґрунтовими ресурсами.

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

Література

1. Босюк А. С., Шестопалов О. В., Разно М. Р. Біоіндикація як метод визначення якості ґрунту та впливу забруднювачів. Екологічні науки. – 2024. – №2(53). – С. 84–89.
2. Романюк, О. І.; Шевчик, Л. З.; Жак, Т. В. Зміна кількості нафти та динаміка фітотоксичності ґрунту при нафтовому забрудненні. Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування. 2018, 2(18), 7-14. doi:10.31471/2415-3184-2018-2(18)-7-14.
3. Бабаджанова О.Ф., Сукач Ю.Г., Сукач Р.Ю. Фітотоксичність ґрунтів, забруднених дизельним паливом. Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України. 2017.№ 3. С. 92–94.
4. Аблєєва І. Ю., Пляцук Л. Д. Фізико-хімічні закономірності забруднення ґрунту вуглеводневими фракціями нафти. Науково-практичний журнал «Екологічні науки». 2017. № 18–19. С. 35–42.
5. Ірина Аблєєва, Леонід Пляцук Системний підхід до підвищення екологічної безпеки нафтовидобувних територій Монографія Сумський державний університет. 2021. 274 с.
6. Бондар Т. О., Шестопалов О. В., Босюк А. С. [та ін.] Біоремедіаційне відновлення нафтозабруднених ґрунтів: експериментальне дослідження Екологічні науки. – 2025. – № 5 (62), ч. 1. – С. 181-188.
7. Paramonov, A., Ablieieva, I., Vaskina, I., Lysytska, A., & Makarenko, N. (2024). The efficiency of organic pollutants degradation in the process of anaerobic digestion of feedstocks with different origin. Ecological Safety and Balanced Use of Resources, 15(1), 24-38. doi: 10.69628/esbur/1.2024.24.
8. Ablieieva I. Theoretical substantiation of the petroleum hydrocarbons destruction by specific microflora using anaerobic digestate. Environmental problems. 2020. Vol. 5, No. 4. P. 191–201. https://doi.org/10.23939/ep2020.04.191
9. Шевчик-Костюк, Л. З., Романюк, О. І., & Ощаповський, І. В. (2022). Особливості забруднення ґрунтів нафтою та нафтопродуктами: огляд. Acta Biologica Ukrainica, (1), 32-40. https://doi.org/10.26661/2410-0943-2022-1-04.
10. Коляда О.В., Коробкова Г.В., Коляда В.П. Аналіз та моделювання фітотоксичності чорноземного ґрунту забрудненого нафтопродуктами. Український журнал природничих наук № 12 с. 371 – 378 2025.
11. Легостаєва Т.В. Вплив важких метелів на активність оксидоредуктазних ферментів ґрунту (модельний експеримент) Вісник Дніпропетровського університету. Біологія. Екологія. – 2009. – Вип. 17, т. 1. – С. 111–114.

Дата першого надходження статті до видання: 30.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 692.23:699.86
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.47

ПРОГНОЗУВАННЯ НОРМОВАНОГО ПОКАЗНИКА ГРАДУСО-ДІБ ОПАЛЮВАЛЬНОГО ПЕРІОДУ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ДІНАМІКИ ЗМІНИ КЛІМАТУ В УКРАЇНІ

Коваленко Ю.Л.[1], **Полив'янчук А.П.**[2]
[1]Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
вул. Чорноглазівська, 17, 61002, м. Харків
[2] Вінницький національний технічний університет
Хмельницьке шосе, 95, 21021, м. Вінниця
kovalenkoy55@gmail.com, polyvianchuk_a@vntu.edu.ua

Стаття присвячена дослідженню динаміки глобальних викидів парникових газів та прогнозуванню змін кліматичного показника градусо-діб опалювального періоду (ГДОП) для різних регіонів Україні. Наукову основу досліджень склали статистичні дані про глобальні антропогенні викиди та концентрацію діоксиду вуглецю – CO_2 в атмосферному повітрі за 1950–2025 рр. відображені у матеріалах міжнародного дослідницького проєкту – Global Carbon Project та дослідницької лабораторії глобального моніторингу CO_2 Національного управління океанічних і атмосферних досліджень – NOAA. Авторами зібрано, узагальнено і проаналізовано архіви метеорологічних спостережень для міст Київ, Харків і Вінниця, які представляють різні кліматичні зони України. Розраховано усереднені за п'ятирічні періоди значення ГДОП для базової внутрішньої температури в будівлях +20°С і порогової зовнішньої температури +8°С. Встановлено стійку тенденцію до зниження ГДОП у всіх регіонах: у Києві – з 3 985 до 3 182 одиниць, у Харкові – з 4 240 до 3 474 одиниць, у Вінниці – з 3 892 до 3 128 одиниць. Для кількісного опису залежностей ГДОП від концентрацій CO_2 розроблено логарифмічні моделі з коефіцієнтом кореляції $r > 0,99$ для кожного міста. Виконано прогноз змін концентрації CO_2 і відповідних значень ГДОП до 2050 р. для різних кліматичних сценаріїв SSP1-1.9, SSP2-4.5, SSP5-8.5, розроблених Міжурядовою групою експертів з питань змін клімату (МГЕЗК). Встановлено, що за реалістичним сценарієм SSP2-4.5 очікується зниження ГДОП на 10–11% порівняно з поточними значеннями, що підтверджує необхідність перегляду чинних нормативних значень ГДОП та врахування прогнозованих кліматичних змін при проєктуванні систем опалення, розробці заходів з термомодернізації будівель і оцінюванні їхньої енергетичної, екологічної та економічної ефективності. *Ключові слова:* парникові гази, діоксид вуглецю, зміна клімату, градусо-доби опалювального періоду (ГДОП), прогнозування, енергозбереження, термомодернізація.

Prognostication the Heating Degree Days normalized indicator based on the analysis of climate change dynamics in Ukraine. Kovalenko Yu., Polyvianchuk A.

The article is devoted to the study of the dynamics of global greenhouse gas emissions and the forecast of changes in the climatic index of the Heating Degree Days (HDD) for different regions of Ukraine. The scientific basis of the research was statistical data on global anthropogenic emissions and the concentration of carbon dioxide – CO_2 in the atmospheric air for 1950–2025. reflected in the materials of the international research project – Global Carbon Project and the research laboratory for global CO_2 monitoring of the National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA. The authors collected, summarized and analyzed archives of meteorological observations for the cities of Kyiv, Kharkiv and Vinnytsia, which represent different climatic zones of Ukraine. The averaged values of HDD for five-year periods were calculated for the basic internal temperature in buildings of +20°C and the threshold external temperature of +8°C. A steady trend towards a decrease in the HDD was established in all regions: in Kyiv – from 3,985 to 3,182 units, in Kharkiv – from 4,240 to 3,474 units, in Vinnytsia – from 3,892 to 3,128 units. To quantitatively describe the dependence of HDD on CO2 concentrations, logarithmic models with a correlation coefficient of $r > 0.99$ were developed for each city. A forecast of changes in CO_2 concentrations and the corresponding HDD values by 2050 was made for various climate scenarios SSP1-1.9, SSP2-4.5, SSP5-8.5, developed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). It was found that under the realistic SSP2-4.5 scenario, a decrease in the HDD by 10–11% compared to current values is expected, which confirms the need to revise the current regulatory values of the HDD and take into account projected climate changes when designing heating systems, developing measures for thermal modernization of buildings, and assessing their energy, environmental, and economic efficiency. *Key words:* greenhouse gases, carbon dioxide, climate change, prognostication, Heating Degree Days (HDD), energy saving, thermal modernization.

Постановка проблеми. Проблема точного визначення кліматичних навантажень на інженерні системи будівель є центральною для розробки та оцінки ефективності заходів з енергозбереження. Основним нормативно визначеним індикатором, який інтегрує в собі тривалість опалювального періоду та температуру атмосферного повітря, є показник градусо-діб опалювального періоду (ГДОП). В міжнародній

© Коваленко Ю.Л., Полив'янчук А.П., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

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

практиці цей параметр відомий як Heating Degree Days (HDD) і використовується для нормування теплової оболонки будівель, розрахунку потреби в паливно-енергетичних ресурсах та оцінки ефективності енергозберігаючих заходів.

ГДОП за своєю суттю є інтегральною величиною, що відображає сумарний дефіцит тепла, який необхідно компенсувати системі опалення для підтримки заданого температурного режиму всередині приміщення протягом усього холодного сезону.

Для території розташування об'єкта досліджень в Україні ГДОП визначають, керуючись документом [1].

Актуальність дослідження. У сучасному світі посилюється тенденція глобальної зміни клімату. Відповідно змінюється показник градусо-діб опалювального періоду. У процесі розробки заходів з енергозбереження та оцінки їх ефективності необхідно враховувати прогнозовану зміну кліматичних умов досліджуваної території.

Метою досліджень є прогнозування змін показника градусо-діб опалювального періоду для врахування цього фактору в процесі техніко-економічного і екологічного обґрунтування проєктів термомодернізації будівель.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження виконано в межах наукової тематики кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля Вінницького національного технічного університету за участю кафедри інженерної екології міст Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова. Результати роботи спрямовані на вирішення практичних завдань енергетичної модернізації будівельного фонду України та розробки нормативно-методичного забезпечення у галузі будівельної кліматології в умовах глобальних кліматичних змін.

Результати досліджень застосовано в процесі виконання держбюджетних науково-дослідних робіт: «Підвищення еколого-енергетичної безпеки урбанізованих територій шляхом поетапного раціонального впровадження енергоефективних заходів в сфері теплопостачання» (ДР № 0123U101998) та «Підвищення ефективності декарбонізації та екологізації комунальної енергетики методом оптимізованого впровадження енергоощадних технологій» (ДР №0124U001473).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основним чинником глобальної зміни клімату є антропогенні викиди парникових газів. Основним джерелом для оцінки історичних та сучасних викидів є Global Carbon Project (GCP), який щорічно публікує Глобальний вуглецевий бюджет [2, 3]. Цей інструмент інтегрує дані про споживання викопного палива, виробництво цементу та зміни в землекористуванні, забезпечуючи найбільш повну картину антропогенного втручання. Моніторинг викидів та концентрацій CO_2 в атмосферне повітря здійснює дослідницька лабораторія у складі Національного управління океанічних і атмосферних досліджень – NOAA Global Monitoring Laboratory [5]. Для аналізу кліматичних даних України використано масиви Центральної геофізичної обсерваторії (ЦГО) імені Бориса Срезневського та проєкт ClimUAd, що оперує даними 178 метеостанцій [6, 7]. Прогнозування базується на Шостій оціночній доповіді Міжурядової групи експертів зі зміни клімату (МГЕЗК) [9] та результатів досліджень Міжнародного інституту прикладного системного аналізу (IIASA) [10, 11].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується дослідження. Попри наявність значного масиву кліматологічних даних, в Україні досі не розроблено кількісних моделей залежності нормативного кліматичного показника ГДОП від концентрації парникових газів в атмосфері. Чинні нормативні значення ГДОП [1] не відображають сучасних тенденцій потепління та потребують актуалізації з урахуванням прогнозованих кліматичних змін, що безпосередньо впливає на точність розрахунків систем теплопостачання та оцінку ефективності заходів з термомодернізації будівель.

Наукова новизна дослідження. Вперше для різних регіонів України – міст Київ, Харків і Вінниця розроблено та верифіковано логарифмічні моделі залежності ГДОП від концентрації CO_2 в атмосфері з коефіцієнтом кореляції $r > 0,99$. Запропоновано методологію прогнозування показника ГДОП на основі кліматичних сценаріїв МГЕЗК, а також сформовано прогнози ГДОП до 2050 року за трьома сценаріями: оптимістичним (SSP1-1.9), реалістичним (SSP2-4.5) та песимістичним (SSP5-8.5).

Методологічне або загальнонаукове значення. Розроблена методологія може бути застосована для будь-яких населених пунктів України за наявності відповідних кліматичних архівів, а також для інших країн і регіонів. Запропоновані логарифмічні моделі дозволяють інтегрувати глобальні кліматичні прогнози в розрахунки локальних енергетичних навантажень, що є важливим як для наукових досліджень у галузі будівельної кліматології, так і для практичного застосування при розробці нормативних документів та стратегій енергетичної модернізації будівельного фонду.

Викладення основного матеріалу. Враховуючи, що діоксид вуглецю – CO_2, є основним антропогенним парниковим газом та виступає головним індикатором цього впливу, відображаючи пряму кореляцію між економічною діяльністю людства та зміною фізико-хімічних параметрів атмосфери, ***на першому етапі досліджень*** було зібрано та узагальнено інформацію про глобальні викиди CO_2 та вміст С в атмосферному повітрі.

Період досліджень – 1950–2025 роки.

В процесі збирання інформації застосовано дані з відкритих джерел офіційних сайтів органів дер-

жавної влади, провідних наукових установ та індексованих наукових видань [2, 3, 4].

За результатами аналізу та узагальнення наявних даних сформовано підсумкову таблицю 1 з осередненими показниками глобальних антропогенних викидів CO_2 та концентрації діоксиду вуглецю в атмосфері за 5-річні періоди з 1951 по 2025 роки. Дані базуються на щорічних звітах Global Carbon Project (Global Carbon Budget 2025) та результатах моніторингу NOAA Global Monitoring Laboratory [5].

На ***другому етапі досліджень*** зібрано та узагальнено інформацію архівів погоди (метеоданих) в трьох містах України: Київ, Харків та Вінниця. Період досліджень – 1950 – 2025 роки. Дані базуються на масивах Центральної геофізичної обсерваторії імені Бориса Срезневського (ЦГО), проєкті ClimUAd, що оперує даними 178 метеостанцій, та сучасних супутникових і наземних спостереженнях, інтегрованих у глобальні бази даних, такі як Eurostat та World Bank Climate Knowledge Portal. [6, 7].

Розраховано середній показник градусо-діб опалювального періоду (ГДОП) за кожні 5 років для цих міст.

Розрахунок виконано для базової внутрішньої температури 20 °С та порогової зовнішньої температури початку та завершення опалювального сезону +8 °С.

Для збирання та узагальнення статистичних кліматичних даних застосовано інструмент Gemini PRO Deep Research.

Для розрахунку ГДОП використано стандартну кліматологічну формулу, адаптовану до українських нормативів:

$$\text{ГДОП} = \sum_{i=1}^{zh} (t_i - t_{ex})$$

де t_i – розрахункова температура внутрішнього повітря (20 °С),

t_{ex} – середня добова температура зовнішнього повітря,

z_h – тривалість опалювального періоду в добах, протягом яких середня добова температура повітря є стійко нижчою або рівною порогу +8 °С.

Результати визначення ГДОП для міст Київ, Харків та Вінниця, осереднені за кожні 5 років, за період 1950 – 2025 роки наведено у таблиці 2.

Для порівняння вказано нормативні значення ГДОП для цих міст.

У всіх досліджуваних містах спостерігається чітко виражений тренд до зниження ГДОП протягом досліджуваного періоду що корелюється з висновками [8].

Тенденція демонструє майже монотонне зниження показника, що корелює зі зростанням вмісту CO_2.

Київ, розташований у зоні переходу між Поліссям та Лісостепом, демонструє значну чутливість до зміни складу атмосфери. Показник ГДОП у столиці впав з пікових 3 985 одиниць до 3 182 одиниць за період з 1951 по 2025 роки. Це свідчить про радикальне пом'якшення зимових умов. Окрім глобального парникового ефекту, на ГДОП Києва впливає феномен "міського острова тепла", коли щільна забудова та техногенне тепловиділення додатково підвищують локальну температуру, зменшуючи потребу в опаленні.

Харків, як найбільш східне місто в дослідженні, характеризується найбільш континентальним клима-

Таблиця 1

Глобальні викиди CO_2 та вміст CO_2 в атмосфері

Період, роки	Глобальні викиди CO_2 (млрд т/рік)	Вміст CO_2 в атмосфері (ppm)
1951–1955	6,72	312,68
1956–1960	8,59	315,42
1961–1965	10,49	318,90
1966–1970	13,37	323,36
1971–1975	16,38	328,96
1976–1980	18,70	335,36
1981–1985	19,30	342,98
1986–1990	21,82	351,14
1991–1995	22,87	357,74
1996–2000	24,48	366,16
2001–2005	27,50	375,48
2006–2010	31,84	385,62
2011–2015	35,09	396,26
2016–2020	35,90	409,02
2021–2025	37,16	421,17

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

Таблиця 2

Результати визначення ГДОП

Рік (період)	ГДОП Київ	ГДОП Харків	ГДОП Вінниця
Нормативні значення	3 538	3 759	3 678
1951–1955	3985	4240	3892
1956–1960	3922	4198	3848
1961–1965	3894	4162	3822
1966–1970	3865	4138	3795
1971–1975	3812	4094	3744
1976–1980	3838	4115	3768
1981–1985	3742	4028	3688
1986–1990	3692	3982	3634
1991–1995	3618	3895	3562
1996–2000	3584	3858	3524
2001–2005	3498	3784	3444
2006–2010	3412	3708	3368
2011–2015	3372	3664	3318
2016–2020	3298	3588	3242
2021–2025	3182	3474	3128

том. Його базові значення ГДОП традиційно вищі, ніж у Києві чи Вінниці, досягаючи 4 240 у холодне п'ятиріччя 1950–1955 роки. Проте навіть у Харкові спостерігається стійке зниження до 3474 одиниць. Континентальність клімату проявляється в більшій інерції: незважаючи на зростання концентрації CO_2, Харків довше зберігає суворіші умови порівняно з іншими регіонами через вплив арктичних та сибірських антициклонів.

Вінниця демонструє найнижчі абсолютні значення ГДОП серед трьох міст у сучасному періоді (3 128 одиниці). Це місто більше відчуває вплив атлантичних повітряних мас, які в умовах глобального потепління стають теплішими та вологішими. Швидкість зниження ГДОП у Вінниці свідчить про те, що центрально-західні регіони України можуть першими відчути потребу в радикальному перегляді опалювальних норм.

Поточні значення ГДОП відрізняються від нормативних. Застосування нормативних значень ГДОП в процесі розробки систем теплопостачання та оцінки ефективності заходів з термомодернізації може призвести до помітної похибки.

На ***третьому етапі досліджень*** проаналізовано динаміку вмісту CO_2 в атмосфері та показника ГДОП для трьох досліджуваних міст (рис.1).

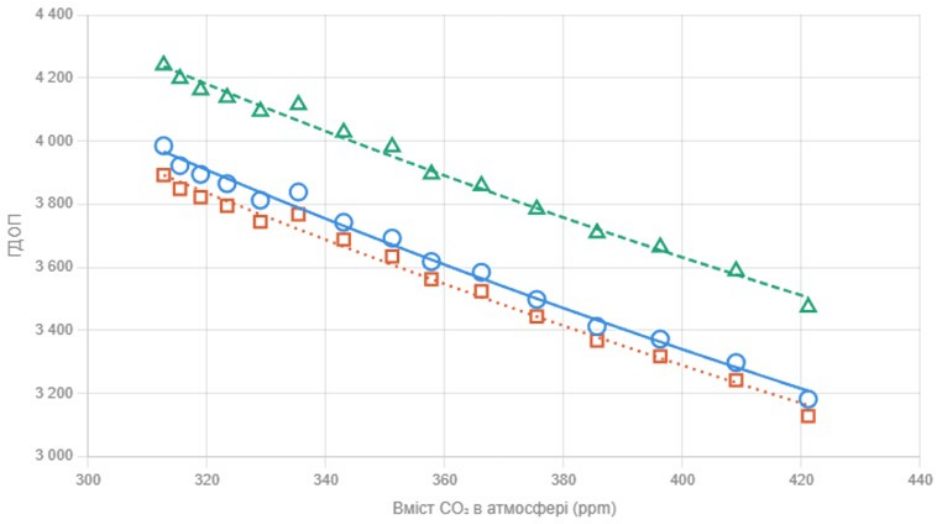


Рис. 1. Залежність ГДОП від концентрації CO_2 в атмосфері

Київ – круги, суцільна лінія, синій колір; Харків – трикутники, штрихова лінія, зелений колір; Вінниця – квадрати, пунктир, помаранчевий колір.

Встановлено, що кліматичні індикатори, засновані на температурі, такі як ГДОП, прямо чи опосередковано корелюють з динамікою концентрації CO_2 в атмосфері. Зі зростанням глобальної концентрації CO_2 спостерігається стійка тенденція до скорочення тривалості холодного періоду та підвищення середніх зимових температур. Це неминуче призводить до зменшення показника ГДОП, що має критичне значення для планування енергетичних потужностей та розробки стратегій енергозбереження.

Виконано моделювання залежності ГДОП від рівня антропогенного навантаження на атмосферу, вираженого через вміст парникових газів. Обрано логарифмічні функції, які демонструють, у порівнянні з іншими, найбільш високу кореляцію між вмістом CO_2 та показником ГДОП у кожному з досліджуваних міст, що підтверджує гіпотезу про те, що ГДОП безпосередньо залежить від вмісту CO_2 в атмосфері. Для дослідження використано узагальнені статистичні дані за період з 1951 по 2025 роки.

Для всіх трьох міст найкращий результат апроксимації дає логарифмічна функція з коефіцієнтом кореляції r > 0,99 – апроксимація дуже висока. Усі три залежності мають однаковий характер: зі збільшенням вмісту CO_2 в атмосфері ГДОП монотонно спадає:

$$ГДОП_{Kyiv} = 18\,593 – 2\,546 \cdot \ln(CO_2),$$
$$R^2 = 0{,}9918; \quad r = 0{,}9959;$$
$$ГДОП_{Kharkiv} = 18\,364 – 2\,459 \cdot \ln(CO_2),$$
$$R^2 = 0{,}9914; \quad r = 0{,}9957;$$
$$ГДОП_{Vinnytsia} = 17\,961 – 2\,449 \cdot \ln(CO_2),$$
$$R^2 = 0{,}9913; \quad r = 0{,}9957.$$

Висока кореляція ГДОП з CO_2 свідчить про те, що кліматичні умови змінюються швидше, ніж цикли оновлення будівельного фонду, що може призвести до масової невідповідності будівель новим реаліям уже через 15–20 років.

На ***четвертому етапі досліджень*** проаналізовано світові сценарії прогнозу викидів та концентрації CO_2 до 2050 року. Прогнозування концентрації CO_2 базується на інтегрованих моделях оцінки, які поєднують економічні, демографічні та технологічні чинники з фізичними процесами в атмосфері, океані та біосфері. Сучасна методологія використана у Шостій оціночній доповіді МГЕЗК [9]. Використання моделей зниженої складності, таких як MAGICC7.0, дозволяє переводити обсяги викидів у конкретні значення концентрації CO_2 в атмосфері [10–11].

Для цілей даного дослідження застосовано три основні сценарії: оптимістичний (SSP1-1.9, спрямований на обмеження потепління до 1,5 °C), реалістичний (SSP2-4.5, відображає поточну політику та помірний прогрес) та песимістичний (SSP5-8.5, передбачає відсутність нових кліматичних заходів) [12–13]. Зведені дані щодо прогнозів концентрації CO_2 в атмосфері наведено у таблиці 3.

На ***п'ятому етапі досліджень*** визначено прогнозні показники ГДОП для досліджуваних міст з використанням розроблених квадратичних моделей для кожного регіону.

Результати розрахунків ГДОП для міст Київ, Харків та Вінниця для різних сценаріїв прогнозу викидів CO_2 наведено у таблиці 4.

З результатів витікає, що є певна невизначеність у прогнозуванні ГДОП, пов'язана з наявністю різних сценаріїв динаміки світових викидів парникових газів. Але за результатами найбільш вірогідного реалістичного сценарію глобальних викидів CO_2, вже у середині сторіччя очікується зниження показника ГДОП у досліджуваних містах на 10–11%, що необхідно враховувати в процесі проєктування систем опалення та заходів з енергозбереження.

Візуалізацію отриманих результатів наведено на рисунку 2.

Головні висновки. Проведений аналіз демонструє глибоку взаємозалежність між глобальними атмосферними процесами та енергетичними потребами міст України. Основними результатами дослідження є:

1. Підтвердження стійкої тенденції до зростання концентрації CO_2 в атмосфері, що за останні 75 років збільшилося на понад 100 ppm, або у 1,35 рази.

2. Встановлено зниження показника ГДОП у Києві, Харкові та Вінниці протягом 1950–2025 років у 1,22-1,25 разів, що вказує на необхідність коригування чинних нормативних значень.

3. Запропоновано методологію прогнозування показника ГДОП.

4. Розроблено та верифіковано логарифмічні моделі залежності ГДОП від вмісту CO_2 у Києві, Харкові та Вінниці з коефіцієнтом кореляції понад 0,99, що дозволяє проводити високоточне прогнозування кліматичних навантажень.

Таблиця 3

Прогноз вмісту CO_2 в атмосфері, (ppm)

Рік	Оптимістичний (SSP1-1.9)	Реалістичний (SSP2-4.5)	Песимістичний (SSP5-8.5)
2030	434,0	444,0	452,0
2035	437,5	459,5	476,0
2040	440,0	475,0	500,0
2045	439,0	491,0	531,5
2050	438,0	507,0	563,0

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

Таблиця 4

Прогнозовані сценарії ГДОП для досліджуваних міст

Рік	ГДОП								
	Песимістичний (SSP5-8.5)			Реалістичний (SSP2-4.5)			Оптимістичний (SSP1-1.9)		
	Київ	Харків	Вінниця	Київ	Харків	Вінниця	Київ	Харків	Вінниця
2030	3 027	3 324	2 984	3 072	3 368	3 028	3 130	3 424	3 084
2035	2 895	3 196	2 857	2 985	3 283	2 944	3 110	3 404	3 064
2040	2 769	3 075	2 737	2 900	3 201	2 863	3 095	3 390	3 051
2045	2 614	2 925	2 587	2815	3 119	2 781	3 101	3 396	3 056
2050	2 467	2 783	2 446	2 733	3 040	2 703	3 107	3 401	3 062

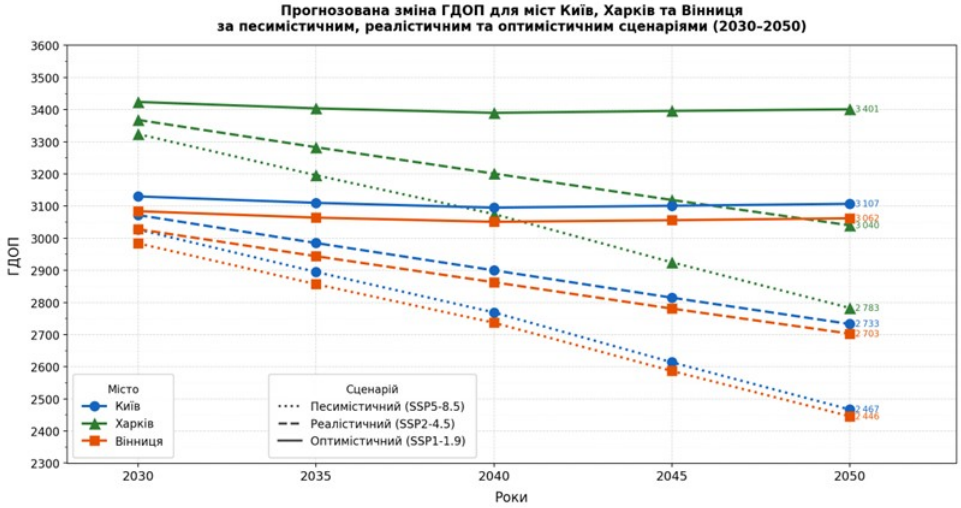


Рис. 2. Прогнозні показники ГДОП для досліджуваних міст

5. Сформовано прогнози ГДОП до 2050 року, згідно з якими за реалістичним сценарієм (SSP2-4.5) очікується подальше зниження потреби в опаленні на 10–11%, що вимагає негайної адаптації інженерних рішень та нормативної бази.

6. Обґрунтовано необхідність переходу до проєктування будівель з урахуванням їхнього повного життєвого циклу та майбутніх кліматичних умов.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати дослідження мають бути використані при розробці стратегій енергетичної модернізації та техніко-економічного обґрунтування проєктів термомодернізації, забезпечуючи стійкість інженерної інфраструктури України в умовах глобальної кліматичної нестабільності. Перспективним напрямом подальших досліджень є розширення географії аналізу на всі обласні центри України та розробка відповідних пропозицій щодо коригування нормативних значень ГДОП з урахуванням прогнозу зміни клімату.

Література

1. ДСТУ-Н Б В.1.1-27 :2010 . Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія. [Чинний від 2011-01-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 72 с.
2. Friedlingstein P. et al. Глобальний вуглецевий бюджет 2025. Вуглецевий портал ICOS . 2025. URL: https://www.icos-cp.eu/science-and-impact/global-carbon-budget/2025 (дата звернення: 17.03.2026).
3. Глобальний вуглецевий проект. Останні дані GCB за 2025 рік. Центр даних глобального вуглецевого бюджету . 2025. URL: https://globalcarbonbudget.org/datahub/the-latest-gcb-data-2025/ (дата звернення: 17.03.2026).
4. Сукупні викиди CO_2. Наш світ у даних . URL: https://ourworldindata.org/grapher/cumulative-co-emissions (дата звернення: 17.03.2026).
5. Глобальна лабораторія моніторингу NOAA. Тенденції щодо вмісту вуглекислого газу в атмосфері: повний запис. Національне управління океанічних і атмосферних досліджень . URL: https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/ (дата звернення: 17.03.2026).
6. Градусодні опалення та охолодження – місячні дані (nrg_chdd_m). Євростат . URL: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_chdd_m/default/table (дата звернення: 17.03.2026).

7. Україна: Історичні кліматичні дані. Портал кліматичних знань Світового банку . URL: https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/ukraine/climate-data-historical (дата звернення: 17.03.2026).
8. Україна: прогнози кліматичних даних. Портал кліматичних знань Світового банку . URL: https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/ukraine/climate-data-projections (дата звернення: 17.03.2026).
9. МГЕЗК. Зміна клімату 2021: Фізичні наукові основи. Внесок Робочої групи I до Шостого оціночного звіту МГЕЗК / Массон-Дельмотт В. та ін. (ред.). Кембридж: Видавництво Кембриджського університету, 2021. 2391 с. DOI: https://doi.org/10.1017/9781009157896 .
10. База даних сценаріїв SSP. Міжнародний інститут прикладного системного аналізу (IIASA) . URL: https://ssp.apps.ece.iiasa.ac.at/ (дата звернення: 17.03.2026).
11. База даних RCP. Міжнародний інститут прикладного системного аналізу (IIASA) . URL: https://tntcat.iiasa.ac.at/RcpDb/ (дата звернення: 17.03.2026).
12. Сценарії SSP для CMIP6. Deutsches Klimarechenzentrum (DKRZ) . URL: https://www.dkrz.de/en/communication/climate-simulations/cmip6-en/the-ssp-scenarios (дата звернення: 17.03.2026).
13. Майнсхаузен М. та ін. Спільний соціально-економічний шлях (SSP) концентрації парникових газів та їх поширення до 2500 року. Розробка геонаучної моделі . 2020. Том 13. С. 3571–3605. DOI: https://doi.org/10.5194/gmd-13-3571-2020 .

Дата першого надходження статті до видання: 02.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 504.75.05:612
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.48

ВРАЗЛИВІСТЬ ЛЮДИНИ ДО ТЕПЛОВОГО СТРЕСУ В УМОВАХ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН: ФІЗІОЛОГІЧНІ МЕЖІ ТА ІНДИВІДУАЛЬНІ РИЗИКИ

Панчук О.І.[1], **Тригуба О.В.**[1], **Погорєлова О.М.**[2]
[1]Кременецька обласна гуманітарно-педагогічна академія імені Тараса Шевченка
вул. Ліцейна, 1, 47003, м. Кременець
[2]Західноукраїнський національний університет
вул. Майдан Перемоги, 3, 46009, м. Тернопіль
olja_dykh@ukr.net, boratun1@ukr.net, GurskaOksana24@gmail.com, yaremakpog@gmail.com

У статті досліджено вразливість людини до теплового стресу в умовах сучасних кліматичних змін із урахуванням фізіологічних меж адаптації та індивідуальних факторів ризику. Метою дослідження є узагальнення фізіологічних механізмів теплового стресу та аналіз індивідуальної вразливості в контексті кліматичних змін. Тепловий стрес розглянуто як багатофакторне явище, що формується внаслідок взаємодії кліматичних, урбаністичних і біофізичних чинників. Обґрунтовано, що зростання частоти, інтенсивності та тривалості теплових хвиль формує нові виклики для системи громадського здоров'я та підвищує рівень екологічної небезпеки для населення.

Узагальнено основні фізіологічні механізми підтримання температурного гомеостазу, зокрема роль метаболічного теплоутворення, шкірного кровотоку та потовиділення у процесах тепловіддачі. Показано, що ефективність терморегуляції залежить від умов довкілля (температури та вологості повітря) і морфофункціональних характеристик організму. Перевищення фізіологічних меж теплової стійкості супроводжується зниженням працездатності та підвищенням ризику теплових уражень.

Систематизовано між- та внутрішньоіндивідуальні фактори вразливості, які охоплюють біологічні (вік, стан здоров'я, антропометричні та гормональні особливості) і функціонально-поведінкові характеристики (рівень фізичної активності, гідратаційний статус, якість сну та умови життєдіяльності). Показано, що урбанізоване середовище, зокрема ефект «міського теплового острова», підсилює теплове навантаження на організм людини.

Обґрунтовано доцільність інтеграційного підходу до оцінки теплового стресу, що поєднує фізіологічні, екологічні та біофізичні аспекти. Визначено, що ефективність зниження теплового навантаження залежить від впровадження профілактичних заходів на індивідуальному, організаційному та на рівні громад і систем громадського здоров'я. *Ключові слова:* тепловий стрес, кліматичні зміни, терморегуляція, фізіологічна адаптація, вразливість населення, екологічна безпека, громадське здоров'я, теплові хвилі.

Human vulnerability to heat stress under climate change: physiological limits and individual risks. Panchuk O., Tryhuba O., Pohorielova O.

This article examines human vulnerability to heat stress in the context of contemporary climate change, taking into account physiological limits of adaptation and individual risk factors. The aim of the study is to summarise the physiological mechanisms of heat stress and to analyse individual vulnerability in the context of climate change. Heat stress is considered a multifactorial phenomenon resulting from the interaction of climatic, urban and biophysical factors. It is argued that the increase in the frequency, intensity and duration of heatwaves poses new challenges for the public health system and raises the level of environmental risk to the population.

The main physiological mechanisms for maintaining thermal homeostasis are summarised, in particular the role of metabolic heat production, cutaneous blood flow and sweating in heat transfer processes. It is shown that the effectiveness of thermoregulation depends on environmental conditions (air temperature and humidity) and the organism's morphofunctional characteristics. Exceeding the physiological limits of heat tolerance is accompanied by a reduction in work capacity and an increased risk of heat-related injuries.

Inter- and intra-individual vulnerability factors have been systematised, covering biological (age, health status, anthropometric and hormonal characteristics) and functional-behavioural characteristics (level of physical activity, hydration status, sleep quality and living conditions). It has been shown that the urban environment, in particular the 'urban heat island' effect, intensifies the heat load on the human body.

The rationale for an integrated approach to assessing heat stress, combining physiological, environmental and biophysical aspects, has been substantiated. It has been determined that the effectiveness of reducing heat stress depends on the implementation of preventive measures at the individual, organisational, community and public health system levels. *Key words:* heat stress, climate change, thermoregulation, physiological adaptation, population vulnerability, environmental safety, public health, heatwaves.

Постановка проблеми. Глобальні кліматичні зміни супроводжуються зростанням частоти, інтенсивності та тривалості теплових хвиль, що призводить до підвищення теплового навантаження на організм людини [1; 2]. У цих умовах фізіологічна стійкість до перегрівання набуває не лише медико-біологічного, а й екологічного значення, оскільки пов'язана з ризиками для здоров'я населення, зниженням працездатності та зростанням вразливості соціальних груп.

© Панчук О.І., Тригуба О.В., Погорєлова О. М., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

У контексті екологічної безпеки тепловий стрес доцільно розглядати як результат взаємодії кліматичних, урбаністичних і біофізичних чинників. Урбанізоване середовище, зокрема ефект «міського теплового острова», підсилює вплив високих температур і обмежує можливості природного охолодження [3; 4].

Водночас сучасні підходи до оцінки теплового навантаження переважно базуються на узагальнених кліматичних показниках і недостатньо враховують індивідуальні фізіологічні особливості організму, що ускладнює об'єктивну оцінку вразливості населення та знижує ефективність адаптаційних заходів. Це зумовлює необхідність комплексного аналізу теплового стресу як багатофакторного явища, що формується на перетині фізіологічних механізмів терморегуляції, біофізичних процесів теплообміну та умов довкілля.

Актуальність дослідження зумовлена зростанням екологічних ризиків для населення внаслідок посилення теплового навантаження в умовах кліматичних змін та підвищенням навантаження на системи громадського здоров'я. Недостатній облік індивідуальних фізіологічних особливостей в існуючих підходах до оцінки теплового стресу обмежує ефективність заходів адаптації та оцінки вразливості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасному науковому дискурсі вплив кліматичних змін на людину розглядається в межах екології людини, громадського здоров'я, біокліматології та екологічної безпеки. Вітчизняні дослідження охоплюють медико-екологічні аспекти, зокрема вплив кліматичних змін і урбанізованого середовища на стан здоров'я населення [5; 6], питання кліматичної освіти та формування екологічної компетентності [7; 8] і роль екосистемних послуг у формуванні сприятливого мікроклімату міських територій [9]. Водночас фізіологічні механізми теплового стресу та їх значення для оцінки екологічної безпеки населення залишаються недостатньо систематизованими. У міжнародній літературі тепловий стрес розглядається як результат взаємодії кліматичних і фізіологічних чинників. У роботі узагальнено підходи до визначення критичних меж теплового навантаження, пов'язані з поєднанням температури та вологості повітря [1], а також обґрунтовано роль механізмів терморегуляції: метаболічного теплоутворення, шкірного кровотоку і потовиділення [10; 11]. Проведений аналіз дозволяє стверджувати, що вразливість до теплового стресу є варіабельною та визначається поєднанням віку, стану здоров'я, рівня фізичної підготовки та умов довкілля, а урбанізоване середовище додатково підсилює теплове навантаження [2-3; 12-13]. Попри значний обсяг досліджень, фізіологічні, біофізичні та екологічні аспекти теплового стресу часто розглядаються відокремлено, що ускладнює комплексну оцінку вразливості людини. Це зумовлює необхідність інтеграційного підходу до аналізу теплового стресу в контексті екології людини та екологічної безпеки.

Зв'язок авторського доробку з науковими і практичними завданнями. Дослідження виконано в межах сучасних підходів до вивчення взаємодії організму людини з чинниками довкілля та пов'язане з проблематикою екології людини, фізіології адаптації й екологічної безпеки. Дослідження спрямоване на узагальнення фізіологічних механізмів терморегуляції в умовах підвищеного теплового навантаження та аналіз їх зв'язку з екологічними ризиками, зумовленими кліматичними змінами. Практичний аспект роботи полягає у можливості застосування отриманих результатів для оцінки вразливості населення до теплового стресу з урахуванням фізіологічних особливостей організму. Викладені положення можуть бути застосовані для обґрунтування профілактичних заходів, оптимізації режимів праці та відпочинку в умовах підвищених температур, а також розроблення адаптаційних рішень у сфері громадського здоров'я та міського планування.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Попри значний обсяг досліджень, присвячених тепловому стресу, низка аспектів цієї проблеми залишається недостатньо розробленою. Зокрема, оцінка теплового навантаження переважно ґрунтується на узагальнених кліматичних показниках без урахування індивідуальних фізіологічних особливостей організму, що знижує точність оцінки вразливості населення. Недостатньо дослідженою є інтеграція біофізичних механізмів терморегуляції з індивідуальними чинниками ризику в умовах кліматичних змін, а також вплив поєднання кліматичних і урбаністичних чинників на фізіологічні реакції людини. Крім того, потребує подальшого опрацювання питання практичного застосування фізіологічних знань у сфері екологічної безпеки, зокрема для розроблення диференційованих адаптаційних стратегій для різних груп населення.

Наукова новизна. У статті узагальнено та систематизовано між- та внутрішньоіндивідуальні фактори вразливості до теплового стресу та обґрунтовано їх інтеграцію з кліматичними й урбаністичними чинниками в межах підходу до оцінки екологічної небезпеки для населення. Удосконалено підхід до розуміння теплового стресу як багатофакторного явища, що визначається взаємодією фізіологічних і середовищних чинників.

Методологічне значення дослідження полягає у формуванні міждисциплінарного підходу до оцінки теплового стресу, який інтегрує положення фізіології людини, екології, біофізики та кліматології. Запропонований підхід розширює уявлення про механізми терморегуляції в умовах кліматичних змін і створює теоретичне підґрунтя для подальших досліджень у сфері екології людини та екологічної безпеки.

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

Викладення основного матеріалу. Кліматичні зміни супроводжуються зростанням частоти та інтенсивності теплових хвиль, що зумовлює необхідність поглибленого аналізу реакцій організму людини на теплове навантаження. У цьому дослідженні тепловий стрес розглядається як функціональний прояв перевищення фізіологічних меж теплової стійкості організму, що забезпечує інтеграцію фізіологічних та екологічних аспектів аналізу.

У дослідженні тепловий стрес аналізується на двох взаємопов'язаних рівнях: фізіологічному, як сукупності механізмів терморегуляції організму, та екологічному, як результат впливу кліматичних і урбаністичних чинників на умови теплообміну. Поєднання цих рівнів дозволяє комплексно оцінити вразливість людини до теплового навантаження в умовах кліматичних змін.

Біофізичні механізми терморегуляції. Підтримання температурного гомеостазу організму ґрунтується на балансі між виробленням і віддачею тепла. Основним джерелом тепла є метаболічні процеси, інтенсивність яких зростає під час фізичної активності [14; 11].

Тепловіддача здійснюється шляхом конвекції, теплопровідності, випромінювання та, передусім, випаровування. В умовах високої температури навколишнього середовища провідним механізмом охолодження стає потовиділення. Ефективність цього процесу значною мірою залежить від вологості повітря: за високої вологості випаровування поту ускладнюється, що знижує ефективність тепловіддачі [10].

З біофізичної точки зору, зміна температури тіла визначається співвідношенням між тепловою продукцією та теплоємністю організму. Наявні дані свідчать, що зміну температури тіла доцільно розглядати як обернено пропорційну масі тіла, яка визначає здатність акумулювати тепло. Важливими чинниками є також ступінь розвитку підшкірної жирової тканини, інтенсивність шкірного кровотоку та ефективність потовиділення [11].

Важливою складовою терморегуляції є підтримання водно-електролітного балансу організму. У спекотних умовах основні втрати води та електролітів відбуваються з потом, інтенсивність якого залежить від кліматичних умов, рівня фізичної активності та характеристик одягу. Добова потреба у рідині може варіювати від 2-4 л у помірному кліматі до 8-16 л у спекотних умовах. Порушення гідратації призводить до зменшення об'єму плазми, підвищення осмолярності крові та зниження ефективності тепловіддачі, що ускладнює підтримання температурного гомеостазу організму [14].

Таким чином, терморегуляція є складним багаторівневим процесом, що поєднує фізіологічні та біофізичні механізми і визначає межі адаптації організму до теплового навантаження.

Фізіологічні межі теплової стійкості. Краще розуміння фізіологічних процесів, що лежать в основі формування теплового стресу, є необхідним для обґрунтування профілактичних заходів, розроблення цілеспрямованих втручань і формування ефективних політик у сфері громадського здоров'я. З позицій еволюційної та біологічної антропології фізіологічні реакції людини на теплове навантаження мають адаптивний характер і були сформовані в процесі еволюції. Такі механізми, як вазодилатація шкірних судин і потовиділення є прикладами функціональних адаптацій до кліматичних стресорів, що забезпечують підтримання теплового гомеостазу в умовах підвищених температур [15].

Узагальнення сучасних досліджень дає підстави стверджувати, що традиційні уявлення про межі теплової стійкості людини є спрощеними та не враховують індивідуальної варіабельності. Аналіз сучасних моделей фізичної працездатності показує, що за екстремального поєднання температури та вологості її зниження може досягати 70-80%, що свідчить про критичне перевищення адаптаційних можливостей організму [16].

На регіональному рівні спостерігається тенденція до зростання частоти теплових хвиль та пов'язаного з ними теплового дискомфорту, що супроводжується посиленням фізіологічного навантаження на організм навіть за умов, які раніше вважалися відносно безпечними. Додатковим чинником ризику є урбанізоване середовище, де ефект «теплового острова» підсилює тепловий стрес і обмежує можливості природного охолодження.

У контексті оцінки фізіологічних меж теплової стійкості особливого значення набуває узгодженість процесів теплоутворення та тепловіддачі, ефективність яких зумовлюється індивідуальними морфофункціональними характеристиками організму. Метаболічне вироблення тепла визначає температуру глибоких тканин, тоді як ефективність тепловіддачі залежить від маси тіла, його складу та теплоємності. За даними досліджень [11], зміна температури тіла обернено пропорційна масі тіла, що відображає здатність організму акумулювати тепло. Важливу роль відіграють також шкірний кровотік і потовиділення, які забезпечують віддачу тепла в умовах підвищених температур.

Ефективність тепловіддачі залежить від морфологічних особливостей організму, зокрема характеристик шкірно-жирового шару, які впливають на теплопровідність і перенесення тепла від внутрішніх тканин до поверхні тіла [10; 11].

Важливим аспектом є індивідуальна вразливість до теплового стресу. Особи з надмірною масою тіла, метаболічними порушеннями (зокрема цукровим діабетом 2 типу), а також люди похилого віку мають знижену здатність до тепловіддачі, що підвищує ризик перегрівання. Соціально-економічні фактори, зокрема обмежений доступ до засобів охолодження, додатково посилюють ці ризики [12; 13].

Суттєву роль у терморегуляції відіграє гормональний статус. У жінок механізми тепловіддачі змінюються залежно від фаз менструального циклу, прийому гормональних препаратів і вікових змін. Під час вагітності відбуваються адаптаційні зміни, що дозволяють підтримувати тепловий баланс навіть за підвищених температур, за умови індивідуалізації фізичних навантажень [17 – 20].

Таким чином, тепловий стрес є багатофакторним явищем, що формується внаслідок взаємодії кліматичних, біофізичних і фізіологічних чинників, а також характеризується значною індивідуальною варіабельністю реакцій організму.

Вплив кліматичних та урбаністичних факторів. Перевищення фізіологічних меж теплової стійкості значною мірою зумовлюється умовами довкілля. Зростання глобальної температури та частоти теплових хвиль призводить до суттєвого посилення теплового навантаження на організм людини [1; 2]. Особливу роль у цьому процесі відіграють урбанізовані території, де формування ефекту «міського теплового острова» зумовлює підвищення температури повітря, зниження інтенсивності нічного охолодження та обмеження природної вентиляції [4].

У таких умовах навіть помірні температурні показники можуть супроводжуватися вираженим фізіологічним дискомфортом. Підвищення вологості повітря та інтенсивності сонячного випромінювання додатково ускладнює процеси тепловіддачі, насамперед через зниження ефективності випаровування поту як провідного механізму охолодження організму.

Дослідження біокліматичних умов свідчать про зростання не лише частоти, але й інтенсивності теплових хвиль, що супроводжується підвищенням рівня теплового стресу навіть у регіонах із помірним кліматом [3]. У результаті формується тенденція до перевищення адаптаційних можливостей організму, зокрема людей похилого віку та осіб із хронічними захворюваннями [2; 13; 21].

Важливим чинником пом'якшення теплового навантаження в урбанізованому середовищі є наявність зелених насаджень, які завдяки затіненню та процесам випаровування вологи сприяють зниженню температури повітря і формуванню більш сприятливого мікроклімату. Це підтверджується дослідженнями екосистемних послуг міських територій [9].

Водночас зміни організації соціальних процесів можуть опосередковано впливати на рівень теплового навантаження. Зокрема, в умовах воєнного стану та енергетичної нестабільності в Україні застосовується гнучкий підхід до організації освітнього процесу, що передбачає варіювання термінів навчального року. Подібні рішення можуть призводити до збільшення тривалості перебування учасників освітнього процесу у періоди підвищених температур. За умов недостатньої адаптованості освітньої інфраструктури це створює додаткові ризики розвитку теплового стресу.

Індивідуальні фактори вразливості. Індивідуальна вразливість до теплового стресу формується під впливом комплексу чинників, що охоплюють як відносно стабільні характеристики організму, так і змінні параметри функціонального стану та умов діяльності. До перших належать вік, антропометричні особливості, стан здоров'я, гормональний статус та інші біологічно зумовлені характеристики, тоді як до других – рівень фізичної активності, гідратаційний статус, тривалість перебування у спекотних умовах, особливості одягу та поведінкові чинники.

Важливим внутрішньоіндивідуальним чинником, що впливає на терморегуляторні реакції, є якість і тривалість сну. На основі аналізу даних обґрунтовано, що депривація сну знижує ефективність тепловіддачі організму, зокрема внаслідок порушення механізмів випаровування та шкірного кровотоку, що призводить до підвищеного накопичення тепла під час фізичного навантаження в умовах спеки. Особливо виражений цей ефект у осіб старшого віку, для яких поєднання недосипання та теплового навантаження суттєво підвищує ризик розвитку теплових уражень [22-23].

З огляду на різну природу цих впливів, доцільною є їх систематизація з поділом на міжіндивідуальні та внутрішньоіндивідуальні фактори, що дає змогу точніше оцінювати ризики теплового перевантаження та інтерпретувати фізіологічні реакції організму в умовах підвищених температур (таблиця 1).

Узагальнення представлених у таблиці даних свідчить, що вразливість до теплового стресу визначається комплексом між- та внутрішньоіндивідуальних факторів, які охоплюють біологічні і функціонально-поведінкові характеристики.

Практичні стратегії адаптації. З огляду на зростання частоти та інтенсивності теплових хвиль, а також індивідуальну варіабельність терморегуляторних можливостей людини, особливого значення набувають заходи профілактики теплового стресу на різних рівнях. На *індивідуальному рівні* ключовими є підтримання адекватної гідратації, уникнення інтенсивної фізичної активності у періоди пікових температур, використання легкого та повітропроникного одягу, а також забезпечення доступу до прохолодного середовища. Важливим є також урахування індивідуальних факторів ризику, зокрема віку, стану здоров'я, рівня фізичної підготовки та гормонального статусу [12; 13].

На рівні *робочого середовища* ефективними є організаційні заходи, спрямовані на зменшення теплового навантаження, зокрема оптимізація режимів праці та відпочинку, обмеження тривалості перебування у спекотних умовах, забезпечення доступу до питної води та створення умов для охолодження. Важливу роль відіграє адаптація робочих процесів

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

Таблиця 1

Між- та внутрішньоіндивідуальні фактори, що впливають на тепловий стрес людини

Категорія факторів	Фактор	Вплив на тепловий стрес
Міжіндивідуальні відмінності	Вік	З віком знижується ефективність терморегуляції (потовиділення, шкірний кровотік), що підвищує ризик теплового стресу та перегрівання [12-13]
	Антропометричні показники	Високий індекс маси тіла та особливості будови тіла знижують ефективність тепловіддачі [12]
	Культурні звички	Обмеження прийому їжі та рідини (наприклад, під час релігійного посту) підвищує ризик дегідратації та теплового стресу [24]
	Шкідливі звички (алкоголь)	Алкоголь підвищує ЧСС і шкірний кровотік, знижує артеріальний тиск, посилює діурез і дегідратацію, що підвищує ризик теплового стресу [25; 26]
	Етнічні відмінності	Впливають на термальний комфорт і поведінкові адаптації до спеки [27]
	Захворювання	Ожиріння, артеріальна гіпертензія та цукровий діабет асоціюються з порушенням механізмів терморегуляції, зокрема зниженням шкірного кровотоку, потовиділення та ефективності тепловіддачі, що підвищує ризик теплового стресу та перегрівання [21; 13]
	Гендерні відмінності	Відмінності у механізмах терморегуляції (потовиділення, кровообіг) впливають на сприйняття та переносимість спеки [17]
	Гормональний статус (менструальний цикл, вагітність, менопауза)	Гормональні коливання (зокрема рівень прогестерону) змінюють пороги активації потовиділення, шкірного кровотоку та базальну температуру тіла [17; 18; 19]
Внутрішньоіндивідуальні відмінності	Одяг	Теплоізоляційні властивості одягу обмежують теплообмін із довкіллям [28]
	Метаболічні потреби	Висока фізична активність підвищує метаболічне теплоутворення та збільшує навантаження на серцево-судинну і терморегуляторну системи [14]
	Недосипання	Погіршує фізіологічні реакції на теплове навантаження [22; 29]
	Тривалість роботи	Повторювані цикли роботи навіть за наявності відпочинку призводять до поступового зниження працездатності внаслідок накопичення теплового навантаження та неповного відновлення терморегуляторних механізмів [30]
	Харчова дієта	Рівень гідратації та склад раціону впливають на ефективність терморегуляції [14]

до кліматичних умов, включаючи зміну графіків роботи та впровадження систем моніторингу теплового стресу [16; 31].

На *рівні громад і систем громадського здоров'я* необхідними є заходи з інформування населення про ризики теплового впливу, впровадження систем раннього попередження про теплові хвилі, забезпечення доступу до охолоджених приміщень та підтримка вразливих груп населення. Водночас важливою складовою адаптації є розвиток і збереження зелених зон, які сприяють зниженню температури повітря завдяки затіненню та процесам випаровування вологи, формуючи більш сприятливий мікроклімат і послаблюючи ефект «міського теплового острова». Наявність зелених насаджень пов'язана зі зменшенням теплового навантаження на організм людини, покращенням теплового комфорту та зниженням ризиків для здоров'я під час теплових хвиль, особливо серед вразливих груп населення. Інтеграція кліматичних ризиків у політики громадського здоров'я та міського планування, з урахуванням екосистемних рішень, є ключовою умовою зниження негативного впливу екстремальних температур на здоров'я населення [3; 4].

Важливою складовою адаптації є інтеграція кліматичних ризиків у систему освіти та формування екологічно відповідальної поведінки населення, що розглядається як один із ключових напрямів підвищення стійкості до змін клімату [7; 8].

Поглиблене розуміння фізіологічних механізмів терморегуляції та факторів індивідуальної вразливості створює підґрунтя для спрямування подальших досліджень у сфері профілактики теплового стресу, розроблення цілеспрямованих адаптаційних заходів, а також формування ефективних управлінських і політичних рішень у сфері громадського здоров'я та екологічної безпеки.

Висновки. Результати дослідження свідчать, що тепловий стрес у контексті кліматичних змін доцільно розглядати не лише як фізіологічну реак-

цію організму, а як комплексний чинник екологічної небезпеки. Зростання частоти та інтенсивності теплових хвиль, особливо в урбанізованому середовищі, призводить до перевищення адаптаційних можливостей організму людини та формує нові екологічні ризики, які безпосередньо впливають на стан громадського здоров'я.

У роботі обґрунтовано, що реальні межі теплової стійкості людини є варіабельними та значною мірою залежать від поєднання кліматичних, біофізичних і індивідуальних чинників. Це зумовлює необхідність переходу від узагальнених оцінок теплового навантаження до диференційованих підходів оцінювання вразливості населення, які враховують фізіологічні особливості організму, стан здоров'я, умови життєдіяльності та соціальні фактори.

Тепловий стрес виступає інтегральним показником взаємодії довкілля та організму людини і може розглядатися як індикатор екологічної безпеки територій. Його посилення в умовах кліматичних змін та урбанізації підвищує навантаження на системи громадського здоров'я, знижує працездатність населення та загострює нерівність у доступі до адаптаційних ресурсів.

Отримані результати обґрунтовують доцільність впровадження комплексного міждисциплінарного підходу до оцінки теплового навантаження та управління відповідними ризиками. Ефективне зниження рівня екологічної небезпеки можливе за умови інтеграції фізіологічних знань у практику екологічного планування та розвитку адаптаційних стратегій на рівні громад. Важливим є також удосконалення систем моніторингу теплового стресу та врахування вразливості різних груп населення при формуванні політик у сфері екологічної безпеки.

Література

1. Sherwood S. C., Huber M. An adaptability limit to climate change due to heat stress. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2010. Vol. 107 (21). P. 9552–9555. https://doi.org/10.1073/pnas.0913352107
2. Vanos J., Guzman-Echavarria G., Baldwin J. W. et al. A physiological approach for assessing human survivability. *Nature Communications*. 2023. Vol. 14. Article 7653. https://doi.org/10.1038/s41467-023-43121-5
3. Shevchenko O., Snizhko S., Matzarakis A. et al. Long-term analysis of thermal comfort conditions during heat waves in Ukraine. *Geographia Polonica*. 2022. Vol. 95. P. 53–70. https://doi.org/10.7163/GPol.0226
4. Святогоров І. Посилення теплового стресу для населення урбанізованих територій на фоні глобальних кліматичних змін. *Екологічна безпека та природокористування*. 2024. № 1 (49). С. 49–59. https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.1.49-59
5. Негода Н. Вплив урбанізованого середовища на стан здоров'я населення. *Техніка будівництва*. 2024. № 40. С. 87–92. https://doi.org/10.32347/tb.2024-40.0309
6. Поручинська І. В., Поручинський В. І., Слащук А. М., Слащук А. А. Здоров'я населення в контексті глобальних змін клімату. *Природнича освіта та наука*. 2024. № 1. С. 60–67. https://doi.org/10.32782/NSER/2024-1.09
7. Дух О. І., Цицюра Н. І., Галаган О. К. Особливості формування у студентської молоді знань про зміни клімату. *Екологічні науки*. 2021. Вип. 6 (39). С. 214–217. https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.6-39.37
8. Дух О. І. Сучасні європейські практики розвитку кліматичної освіти. *Педагогічна академія: наукові записки*. 2025. № 14. https://doi.org/10.5281/zenodo.14847214
9. Бондар О. Б., Мельник Є., Бицюра Л., Дух О. І., Ярема О., Файфура В. Оцінювання екосистемних послуг зелених насаджень Парку культури й відпочинку імені Тараса Шевченка (м. Кременець) з використанням інструменту i-Tree Eco. *Український журнал природничих наук.* 2023. № 5. С. 109–116. https://doi.org/10.32782/naturaljournal.5.2023.12
10. Havenith G., Fiala D. Thermal indices and thermophysiological modeling for heat stress. *Comprehensive Physiology*. 2016. Vol. 6. P. 255–302. https://doi.org/10.1002/j.2040-4603.2016.tb00668.x
11. Cramer M. N., Gagnon D., Laitano O., Crandall C. G. Human temperature regulation under heat stress in health, disease, and injury. *Physiological Reviews*. 2022. Vol. 102 (4). P. 1907–1989. https://doi.org/10.1152/physrev.00047.2021
12. Flouris A. D., McGinn R., Poirier M. P. et al. Screening criteria for increased susceptibility to heat stress during work or leisure in hot environments in healthy individuals aged 31–70 years. *Temperature*. 2017. Vol. 5 (1). P. 86–99. https://doi.org/10.1080/23328940.2017.1381800
13. Gildner T. E., Levy S. B. Intersecting vulnerabilities in human biology: synergistic interactions between climate change and increasing obesity rates. *American Journal of Human Biology*. 2021. Vol. 33. e23460. https://doi.org/10.1002/ajhb.23460
14. Sawka M. N., Montain S. J., Latzka W. A. Hydration effects on thermoregulation and performance in the heat. *Comparative Biochemistry and Physiology A*. 2001. Vol. 128 (4). P. 679–690. https://doi.org/10.1016/S1095-6433(01)00274-4
15. Pisor A. C., Jones J. H. Human adaptation to climate change. *American Journal of Human Biology*. 2021. Vol. 33 (4). e23530. https://doi.org/10.1002/ajhb.23530
16. Foster J., Smallcombe J., Hodder S. et al. An advanced empirical model for quantifying the impact of heat and climate change on human physical work capacity. *International Journal of Biometeorology*. 2021. Vol. 65. P. 1–15. https://doi.org/10.1007/s00484-021-02105-0
17. Kaciuba-Uscilko H., Grucza R. Gender differences in thermoregulation. *Current Opinion in Clinical Nutrition and Metabolic Care*. 2001. Vol. 4 (6). P. 533–536. https://doi.org/10.1097/00075197-200111000-00012
18. Filipec M., Durin M. J. Thermoregulation and endocrine response during exercise in pregnancy. *Physiologia*. 2025. Vol. 5. Article 2. https://doi.org/10.3390/physiologia5010002
19. O'Rourke N., Dervis S., da Silva D. F. et al. Heat production during exercise in pregnancy. *Pflügers Archiv – European Journal of Physiology*. 2024. Vol. 476. P. 769–778. https://doi.org/10.1007/s00424-024-02929-w

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

20. Smallcombe J. W., Puhenthirar A., Casasola W. et al. Thermoregulation during pregnancy. *Sports Medicine*. 2021. Vol. 51. P. 2655–2664. https://doi.org/10.1007/s40279-021-01504-y
21. Kenny G. P., Yardley J., Brown C. et al. Heat stress in older individuals and patients with common chronic diseases. *Canadian Medical Association Journal*. 2009. Vol. 182. P. 1053–1060. https://doi.org/10.1503/cmaj.081050
22. Koetje N. J., Kirby N. V., O'Connor F. K. et al. Effect of 24-h sleep deprivation on whole-body heat loss in older males during exercise in the heat. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2025. Vol. 57 (12). P. 2715–2723. https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000003812
23. Koetje N. J., Kirby N. V., O'Connor F. K. et al. Effects of 24-h sleep deprivation on whole-body heat exchange in young men during exercise in the heat. *European Journal of Applied Physiology*. 2025. Vol. 125 (6). P. 1565–1576. https://doi.org/10.1007/s00421-025-05705-5
24. Manjunath G., Aravindhakshan R., Varghese S. Effect of fasting during Ramadan on thermal stress parameters. *Eastern Mediterranean Health Journal*. 2019. Vol. 25 (1). P. 34–39. https://doi.org/10.26719/emhj.18.013
25. Lefebvre K., Brough A., Chaseling G. et al. The sex-dependent effect of alcohol consumption on physiological responses to acute heat stress. *Physiology*. 2025. Vol. 40 (S1). https://doi.org/10.1152/physiol.2025.40.S1.1641
26. Brough A., Lefebvre K., Mihalcin E., Ravanelli N. The physiological and perceptual responses during acute heat stress following alcohol consumption. *Physiology*. 2024. Vol. 39. https://doi.org/10.1152/physiol.2024.39.S1.2560
27. Havenith G., Griggs K., Qiu Y. et al. Higher comfort temperature preferences for anthropometrically matched Chinese and Japanese versus white-western-middle-European individuals. *Building and Environment*. 2020. Vol. 183. Article 107162. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107162
28. Havenith G. Interaction of clothing and thermoregulation. *Exogenous Dermatology*. 2002. Vol. 1 (5). P. 221–230. https://doi.org/10.1159/000068802
29. Romeijn N., Verweij I. M., Koeleman A. et al. Cold hands, warm feet: sleep deprivation disrupts thermoregulation and its association with vigilance. *Sleep*. 2012. Vol. 35 (12). P. 1673–1683. https://doi.org/10.5665/sleep.2242
30. Smallcombe J. W., Foster J., Hodder S. G. et al. Quantifying the impact of heat on human physical work capacity. *International Journal of Biometeorology*. 2022. Vol. 66 (12). P. 2463–2476. https://doi.org/10.1007/s00484-022-02370-7
31. Ioannou L. G., Foster J., Morris N. B. et al. Occupational heat strain in outdoor workers: a comprehensive review and meta-analysis. *Temperature*. 2022. Vol. 9 (1). P. 67–102. https://doi.org/10.1080/23328940.2022.2030634

Дата першого надходження статті до видання: 29.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 551.583:581.522:502.172(477.73)
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.49

БАГАТОРІЧНА ДИНАМІКА КЛІМАТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА РАРИТЕТНУ ФІТОБІОТУ МИКОЛАЇВСЬКОЇ ОБЛАСТІ

Патрушева Л.І.
Чорноморський національний університет імені Петра Могили
вул. Віталія Белінського, 44, 54046, м. Миколаїв
lpatruseva2@gmail.com

У статті досліджено багаторічну динаміку кліматичних показників у межах Миколаївської області та проаналізовано її можливий вплив на раритетну фітобіоту регіону. Актуальність роботи зумовлена посиленням сучасних кліматичних змін у степовій зоні Півдня України, що проявляються через підвищення температурного фону, трансформацію режиму атмосферних опадів, посилення посушливості та зростання частоти екстремальних погодних явищ. Такі зміни створюють додаткові екологічні ризики для рідкісних видів рослин, поширення яких пов'язане з вузькими екологічними нішами, специфічними гідротермічними умовами та високою чутливістю до порушення сезонного ритму розвитку.

Метою дослідження є виявлення основних багаторічних кліматичних тенденцій у межах Миколаївської області та оцінка їхнього потенційного впливу на види II та III категорій Червоної книги України. Дослідження проведено з використанням багаторічних рядів температурних показників і атмосферних опадів за даними метеорологічних спостережень у Миколаєві та Первомайську за період 1946–2025 рр. У процесі аналізу розглянуто зміни середньорічної температури повітря, середніх температур квітня та жовтня, максимальних температур липня, мінімальних температур січня, річної амплітуди температур, а також сезонна динаміка атмосферних опадів. Для екологічної інтерпретації отриманих результатів використано відомості про критичні умови існування раритетних видів, їхні ключові сезони розвитку, потребу у волозі, температурні межі толерантності та чутливість до м'яких зим.

Установлено, що в межах досліджуваної території спостерігається виражене потепління, найбільш інтенсивне для зимових мінімумів і літніх максимумів, що свідчить про одночасне пом'якшення зимових умов і посилення літнього теплового навантаження. Для перехідних сезонів виявлено тенденцію до підвищення температури, що вказує на подовження теплого періоду року. Аналіз сезонного розподілу опадів показав скорочення весняного зволоження на тлі зростання осінніх і зимових опадів, що свідчить про перерозподіл атмосферної вологи між сезонами року. За умов підвищення температури це створює передумови до посилення аридизації природного середовища навіть без різкого зменшення загальної кількості опадів.

Визначено, що найбільш вразливими до виявлених кліматичних змін є ранньовесняні види, види з високою залежністю від весняного зволоження, а також таксони, чутливі до порушення сезонного ритму розвитку, перегріву та висихання субстрату. Отримані результати можуть бути використані для оцінки кліматичних ризиків, визначення пріоритетів моніторингу та обґрунтування природоохоронних заходів щодо збереження раритетної фітобіоти Миколаївської області в умовах сучасних кліматичних змін. *Ключові слова:* кліматичний моніторинг, раритетна фітобіота, степове біорізноманіття, кліматичні зміни, геопросторовий аналіз, екологічні ризики.

Long-term dynamics of climatic indicators and its impact on the rare phytobiota of the Mykolaiv region. Patrusheva L.

The article examines the long-term dynamics of climatic indicators within the Mykolaiv region and analyzes their possible impact on the region's rare phytobiota. The relevance of the study is driven by the intensification of contemporary climate change in the steppe zone of southern Ukraine, manifested through rising background temperatures, transformation of precipitation patterns, increasing aridity, and a higher frequency of extreme weather events. Such changes create additional ecological risks for rare plant species whose distribution is associated with narrow ecological niches, specific hydrothermal conditions, and high sensitivity to disruptions in seasonal developmental rhythms.

The aim of the study is to identify the main long-term climatic trends within Mykolaiv region and to assess their potential impact on species listed in Categories II and III of the Red Data Book of Ukraine. The research materials consisted of a long-term series of temperature and precipitation data from meteorological observations in Mykolaiv and Pervomaisk for the period 1946–2025. The analysis considered changes in mean annual air temperature, mean temperatures of April and October, maximum temperatures of July, minimum temperatures of January, annual temperature amplitude, and the seasonal dynamics of atmospheric precipitation. For the ecological interpretation of the results, information was used on the critical habitat conditions of rare species, their key developmental seasons, moisture requirements, temperature tolerance limits, and sensitivity to mild winters.

It has been established that the study area exhibits a pronounced warming trend, most intense for winter minima and summer maxima, indicating both milder winter conditions and increased summer heat stress. Transitional seasons show a tendency toward rising temperatures, suggesting an extension of the warm period of the year. The analysis of seasonal precipitation distribution revealed a reduction in spring moisture supply against the background of increased autumn and winter precipitation, indicating a redistribution of atmospheric moisture between seasons. Under conditions of rising temperatures, this creates prerequisites for increasing environmental aridization even without a sharp decrease in total precipitation.

© Патрушева Л.І., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

It was determined that the species most vulnerable to the identified climatic changes are early spring species, species highly dependent on spring moisture, and taxa sensitive to disruptions in seasonal developmental rhythms, overheating, and substrate desiccation. The results obtained can be used to assess climatic risks, determine monitoring priorities, and substantiate conservation measures aimed at preserving the rare phytobiota of Mykolaiv region under contemporary climate change conditions. *Key words:* climate monitoring, rare phytobiota, steppe biodiversity, climate change, geospatial analysis, ecological risks.

Постановка проблеми. У контексті глобальних кліматичних змін степова зона Північного Причорномор'я зазнає істотних трансформацій, зумовлених змінами температурного та водного режимів. Багаторічні тренди температури повітря, характер, сезонність та інтенсивність атмосферних опадів істотно впливають на стабільність природних ландшафтних комплексів, структуру рослинного покриву й рівень біорізноманіття регіону. Особливо вразливою до кліматичних коливань є раритетна фітобіота з обмеженим адаптаційним потенціалом. У зв'язку з цим, для збереження рідкісних і зникаючих видів рослин, виникає необхідність дослідження впливу багаторічної динаміки кліматичних показників на їх стан з метою оцінки рівня їхньої вразливості та прогнозування можливих змін у структурі фітобіоти.

Актуальність дослідження зумовлена тим, що аналіз багаторічної динаміки кліматичних показників та її впливу на стан рідкісних і зникаючих видів рослин є важливим для сучасних екологічних і геоботанічних досліджень. Розуміння просторово-часових особливостей сезонної динаміки температури повітря та атмосферних опадів дозволяє визначити можливі ризики для збереження зникаючих і вразливих видів степової фітобіоти та біорізноманіття регіону в цілому.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження виконано в руслі сучасних наукових підходів до вивчення впливу кліматичних змін на біотичне та ландшафтне різноманіття. Отримані результати спрямовані на вирішення актуальних наукових завдань, пов'язаних із оцінкою впливу багаторічної динаміки кліматичних показників на стан раритетної фітобіоти степової зони. Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів для оцінки ризиків збереження рідкісних і зникаючих видів рослин, а також при розробці заходів щодо їх охорони та адаптації природних екосистем до змін клімату. Отримані результати можуть бути використані у практиці управління територіями природно-заповідного фонду для обґрунтування заходів збереження біотичного та ландшафтного різноманіття і планування природоохоронної діяльності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз результатів проведених досліджень доводить, що кліматичні зміни у поєднанні з трансформацією середовищ існування можуть призводити до зміщення ареалів рослин і зміни структури рослинного покриву [1].

За результатами моделювання впливу кліматичних змін на рослинність Європи встановлено, що до середини XXI століття можливі суттєві трансформації біорізноманіття та ареалів видів. Зокрема, прогнозується зникнення в середньому до 32% видів рослин у межах окремих територій, а також зміщення їх ареалів у північно-східному напрямку. Такі зміни пов'язані з трансформацією кліматичних умов і свідчать про високу чутливість рослинного покриву до сучасних кліматичних трендів [2]. Зазначені тенденції є особливо актуальними для степової зони України, де зміни клімату можуть призводити до трансформації структури фітобіоти та втрати раритетних видів.

Сучасні дослідження свідчать, що степова зона України є однією з найбільш уразливих до кліматичних змін територій, для якої характерні процеси підвищення температури повітря, збільшення тривалості без дощових періодів та трансформації режиму та характеру атмосферних опадів.

У звіті «Overall Climate Change Impact Assessment for Ukraine» [3] наведено комплексну оцінку кліматичних змін на території України. Для південного регіону наведено прогноз, який також відображає тенденції до підвищення температури повітря, зростання частоти посух та нерівномірності розподілу атмосферних опадів. Встановлено посилення екстремальних кліматичних явищ, що формує додаткові ризики не лише для розвитку ґрунтових процесів [4], але й для стану природної рослинності.

Неістотні зміни клімату сумісні зі стійкістю екосистем і їхніми функціями, проте їх швидкі зміни негативно позначаються на біорізноманітті. Очікується, що нинішній цикл зміни клімату в майбутньому призведе до зменшення біорізноманіття. Багато видів не зможуть адаптуватися до умов життя, що зазнають швидких змін. Отже, їм загрожуватиме зникнення [5].

Дідух Я. обґрунтовує, що через високу швидкість сучасних кліматичних змін, яка перевищує адаптаційні можливості рослин, реакція видів зводиться до трьох стратегій – міграції, адаптації або вимирання, що веде до докорінної трансформації структури та функціонування екосистем [6].

Особливістю раритетної фітобіоти степової зони є підвищена чутливість до змін кліматичних умов через обмежений адаптаційний потенціал і вузьку екологічну амплітуду. Мойсієнко І. зазначає, що умови фрагментації природного рослинного покриву додатково посилюють вразливість таких видів, оскільки ізольовані ділянки рослинності функціонують як рефугіуми і мають обмежені можливості до просторової міграції [7].

Найбільш повну та об'єктивну інформацію щодо впливу динаміки кліматичних змін на раритетні види фітобіоти можна отримати шляхом використання геоінформаційних систем і даних дистанційного зондування Землі. На відміну від наземних метеорологічних спостережень, які мають точковий і фрагментований характер, дані дистанційного зондування Землі забезпечують суцільне просторове покриття та безперервність у часі. Це дає змогу комплексно оцінювати просторово-часову диференціацію кліматичних факторів і виявляти території з підвищеним рівнем екстремальності. Такі підходи є важливими для аналізу поширення рідкісних і вразливих видів рослин і прогнозування змін рослинного покриву [8].

Отже, результати сучасних наукових досліджень свідчать, що кліматичні зміни є визначальним фактором трансформації степових екосистем, які в поєднанні з фрагментацією природного середовища зумовлюють зростання ризиків для збереження раритетної фітобіоти. Це обумовлює необхідність комплексного аналізу багаторічної динаміки кліматичних показників та її впливу на вразливі компоненти біорізноманіття.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених кліматичним змінам та їх впливу на природні екосистеми, недостатньо вивченими залишаються регіональні особливості багаторічної динаміки кліматичних показників у степовій зоні Північного Причорномор'я та їх вплив на стан раритетної фітобіоти. Наявні роботи здебільшого зосереджені на загальних тенденціях зміни клімату або окремих компонентах біорізноманіття без комплексного аналізу їх взаємозв'язку. Водночас недостатньо дослідженим залишається питання сезонної специфіки кліматичних змін та її впливу на зникаючі та вразливі види рослин, особливо в межах територій природно-заповідного фонду.

Метою статті є аналіз багаторічної динаміки кліматичних показників у межах Миколаївської області та оцінка їхнього впливу на стан і просторове поширення раритетної фітобіоти.

Для досягнення поставленої мети було визначено такі завдання:

1. проаналізувати багаторічну динаміку основних кліматичних показників (температури повітря та атмосферних опадів) на території Миколаївської області;

2. визначити сезонну динаміку температурного та водного режимів у межах досліджуваного регіону;

3. оцінити сучасний стан та особливості поширення раритетної фітобіоти із залученням відкритих баз даних;

4. вивчити характер впливу зміни кліматичних умов на вразливі та зникаючі види рослин;

5. визначити потенційні екологічні ризики для збереження раритетної фітобіоти в умовах кліматичних змін.

Наукова новизна одержаних результатів. У статті вперше здійснено сезонний аналіз багаторічної динаміки кліматичних показників степової зони Північного Причорномор'я, в межах Миколаївської області, та їх впливу на стан раритетної фітобіоти. Встановлено сучасні тенденції зміни температурного режиму та атмосферних опадів і визначено їх значення для функціонування природних екосистем регіону.

Виявлено, що сучасні кліматичні зміни в регіоні супроводжуються перебудовою сезонного режиму атмосферних опадів, яка проявляється у зменшенні весняного зволоження та збільшенні опадів в осінньо-зимовий період. Уточнено екологічне значення часової невідповідності між сезонною потребою рослин у волозі та фактичним режимом її надходження як одного з ключових чинників впливу на раритетну фітобіоту.

Визначено групи видів з підвищеною кліматичною вразливістю, зокрема ранньовесняні рослини та види, чутливі до весняно-літніх посух і порушення сезонного ритму розвитку.

Методологічне та загальнонаукове значення одержаних результатів. Методологічне значення дослідження полягає у застосуванні комплексного підходу до аналізу багаторічної динаміки кліматичних показників із урахуванням їх сезонної специфіки та оцінки впливу на раритетну фітобіоту. Отримані результати уточнюють роль сезонної нерівномірності температурного та гідротермічного режимів як одного з ключових чинників формування кліматичної вразливості рослин.

Загальнонаукове значення роботи полягає у поглибленні уявлень про взаємозв'язок кліматичних змін і стану природної рослинності степової зони, а також у розширенні підходів до оцінки впливу сучасних кліматичних трансформацій на біорізноманіття, зокрема в межах територій природно-заповідного фонду.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження базується на аналізі кліматичних даних за період 1946–2025 рр., отриманих з відкритих глобальних та регіональних джерел. Основу складають дані реаналізу ERA5, доступного через Copernicus Climate Data Store [9], а також дані платформи NASA POWER [10], що інтегрує супутникові спостереження та результати атмосферного моделювання. Для геопросторового аналізу та узагальнення розподілу кліматичних показників використано картографічні матеріали Українського гідрометеорологічного інституту [11].

Вибір періоду дослідження (1946–2025 рр.) зумовлений необхідністю виявлення довготривалих кліматичних змін на основі репрезентативного ряду метеорологічних спостережень. Початок періоду

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

відповідає формуванню систематичних інструментальних вимірювань, що забезпечують порівнюваність і надійність кліматичних даних. Тривалість обраного інтервалу дозволяє виявити стійкі кліматичні тренди, зокрема прояв сучасного потепління, а також оцінити зміни частоти екстремальних погодних явищ [12, 13].

У процесі роботи проведено аналіз динаміки температурного режиму, зокрема змін середніх температур повітря у квітні та жовтні, максимальних температур у липні та серпні, мінімальних температур у січні. Така вибірка дозволила оцінити річну амплітуду температур, виявити тенденції до зростання величини та частоти річних температурних екстремумів, а також розширення тривалості теплого періоду року. Аналіз режиму атмосферних опадів включав дослідження їх сезонного розподілу та міжрічної мінливості.

Для аналізу біотичного компонента використано перелік видів II (вразливі) та III (рідкісні) категорій Червоної книги України, поширених у межах Миколаївської області. Оцінка потенційної вразливості до кліматичних змін здійснювалась на основі екологічних особливостей цих видів, зокрема чутливості до температурного режиму та умов зволоження.

На основі зіставлення кліматичних трендів і екологічних характеристик видів здійснено оцінку ступеня ризику їх подальшого існування в умовах сучасних кліматичних змін.

Аналіз багаторічної динаміки температурних показників метеостанцій Миколаїв і Первомайськ засвідчив наявність чітко вираженого тренду до потепління на території Миколаївської області (рис.1). Отримані результати підтверджують, що зміни температурного режиму на півдні та півночі регіону мають синхронний характер, що відзначається сезонними особливостями. Це дозволяє розглядати їх як один із провідних кліматичних чинників трансформації екологічних умов існування місцевої раритетної фітобіоти.

Встановлено, що середньорічна температура повітря в обох пунктах спостережень демонструє близькі темпи зростання – на рівні +0,30…+0,35 °С за 10 років, що вказує на регіонально узгоджений характер сучасного потепління.

Особливо показовими є зміни температурного режиму у міжсезоння, що має безпосередній вплив на фенологію рослин. Для квітня встановлено стійке підвищення середньої температури на +0,25…+0,30 °С/10 років, що підвищує ймовірність поступового зміщення початку вегетаційного періоду на більш ранній час. Мінімальні та максимальні значення середньомісячної температури у квітні в обох пунктах майже збігаються, що підтверджує синхронність весняного потепління в межах області. Для раритетних видів флори це означає зміну строків фаз розвитку, а також підвищення ризику пошкодження рослин у разі критичного зниження температур навесні.

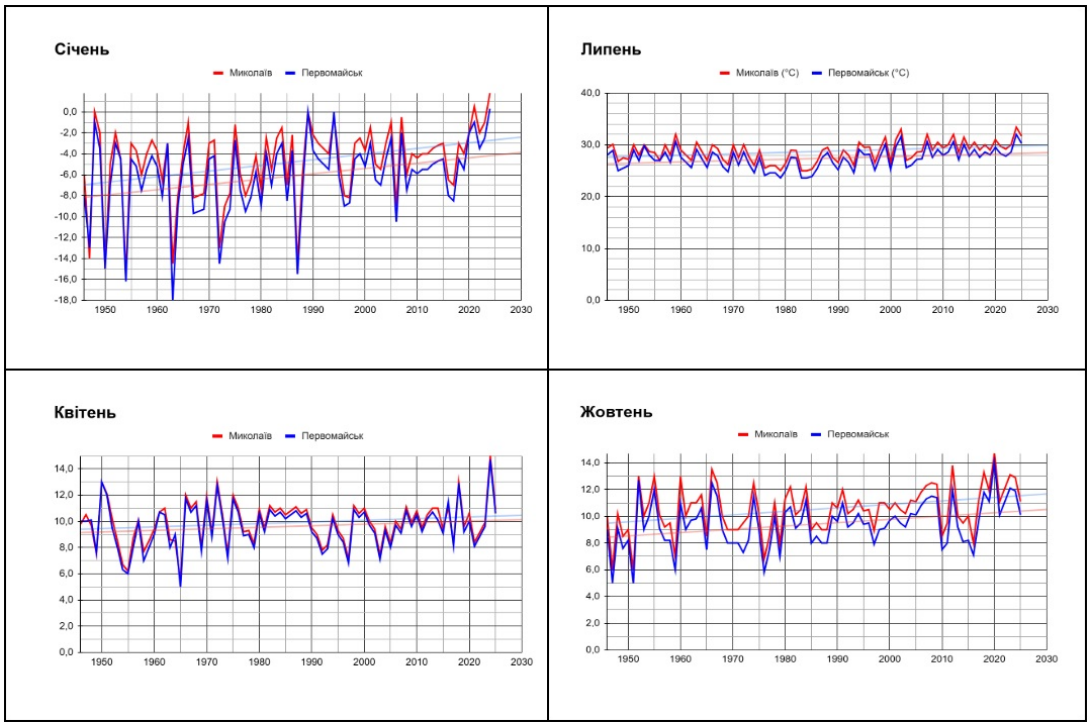


Рис. 1. Хід температур у різні сезони року

Для жовтня виявлено ще більш виразний тренд потепління – на рівні +0,30…+0,35 °С/10 років, що свідчить про продовження теплого періоду року та зміщення межі завершення активної вегетації на пізніший час. Особливо швидко жовтневі температури зростали протягом останнього десятиліття (рис. 2). Осіннє потепління є важливим фактором зміни річного циклу розвитку рослин, зокрема для видів, чутливих до сезонного ритму спокою та завершення вегетації.

Найбільш інтенсивні зміни простежуються в літній та зимовий періоди, тобто в сезони, що формують екстремальні екологічні умови для рослинного покриву. Для максимальних температур липня характерне найшвидше зростання серед усіх проаналізованих показників – +0,40…+0,50 °С/10 років. Мінімальні значення цього показника спостерігалися у 1979, 1983 та 1984 рр., тоді як абсолютні максимуми зафіксовано у 2024 р. (33,4 °С у Миколаєві та 32,0 °С у Первомайську). Зростання величини літніх температурних максимумів та збільшення частоти їх повторів є особливо критичним для раритетної флори, оскільки воно посилює тепловий і водний стрес, прискорює висушування ґрунту, скорочує тривалість оптимальних умов для генеративного розвитку та підвищує ймовірність пригнічення популяцій деяких видів.

Ще більш виразною є динаміка мінімальних температур січня, для яких встановлено найвищі темпи підвищення – +0,45…+0,60 °С за 10 років. Це свідчить про суттєве пом'якшення зимових умов у межах області. Найнижчі значення січневих мінімумів зафіксовані у 1954 р. для Миколаєва (–15,5 °С) та у 1963 р. для Первомайська (–18,0 °С), тоді як максимальні значення спостерігались у 2024 р. (1,8 °С та 0,3 °С відповідно). Особливо потепління січня є дуже помітним у 2010–2020-х роках, коли значення наближаються до значно вищих рівнів порівняно з серединою XX ст. (рис.2). Позитивним є те, що зимове потепління може знижувати ризик вимерзання окремих теплолюбних видів, однак негативним є порушення природного режиму зимового спокою; також може сприяти передчасній активації вегетаційних процесів і підвищує вразливість рослин до пізніх заморозків.

Річна амплітуда температур повітря відображає контрастність сезонного ходу температур і відображає ступінь континентальності клімату. У Миколаєві та Первомайську цей показник має значну міжрічну мінливість, але в цілому виявляє тенденцію до незначного зменшення (рис.3). Це зумовлено передусім швидшим підвищенням зимових температур порівняно з літніми. Для Первомайська амплітуда залишається дещо вищою, що підтверджує більш континентальний характер клімату.

Поряд із температурним режимом, не менш важливим індикатором кліматичних змін є багаторічна динаміка атмосферних опадів (рис. 4), оскільки саме поєднання термічного та вологісного режимів формує реальні екологічні умови існування раритетної фітобіоти.

Аналіз багаторічної динаміки річної кількості атмосферних опадів у межах Миколаївської області за період 1946–2024 рр. свідчить про значну мінливість зволоження по роках та відсутність чітко вираженої сталої тенденції до зменшення або збільшення річних сум опадів. Протягом досліджуваного періоду річна кількість опадів змінювалася нерівномірно. У часовому ряду чітко простежується чергування посушливих, близьких до середніх та вологих років, причому амплітуда коливань є досить високою і вона зростає починаючи з 2000-х років.

Для природних екосистем Миколаївської області така динаміка має важливе значення, оскільки саме режим атмосферного зволоження визначає умови

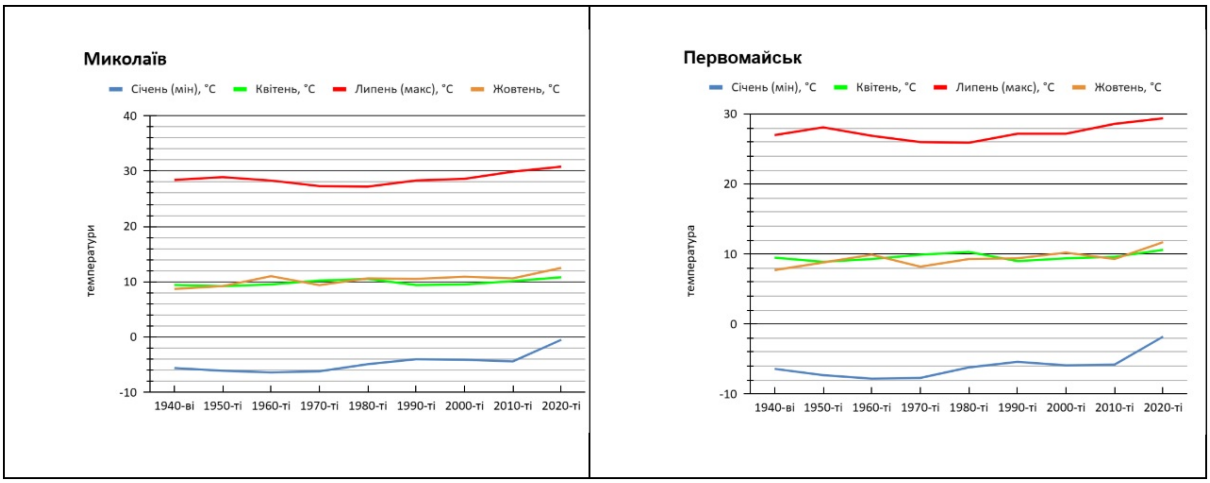


Рис. 2. Декадна динаміка температурних показників у м. Миколаїв і м. Первомайськ

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

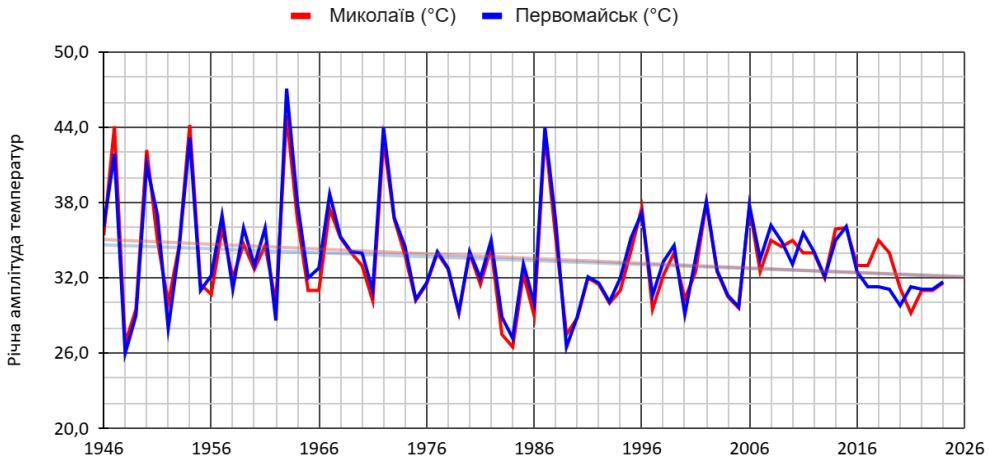


Рис. 3. Багаторічна динаміка річної амплітуди температур повітря у м. Миколаїв і м. Первомайськ

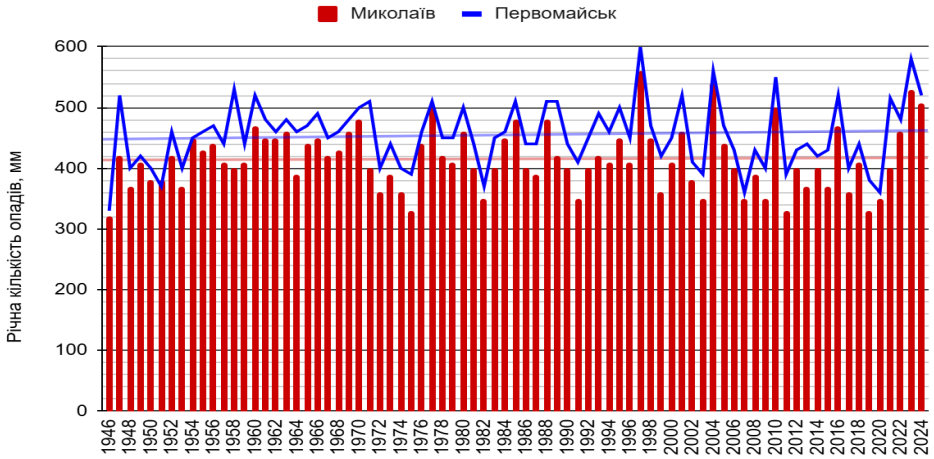


Рис. 4. Динаміка річної кількості атмосферних опадів у Миколаївській області (1946–2024 рр.)

водозабезпечення ґрунтів, інтенсивність вегетаційних процесів і стабільність рослинних угруповань. В умовах степової зони навіть короткочасні відхилення від багаторічної норми опадів можуть мати суттєві екологічні наслідки, особливо для чутливих видів.

Для раритетної фітобіоти Миколаївської області висока міжрічна мінливість опадів є одним із ключових кліматичних ризиків, оскільки вона може спричиняти зниження ймовірності проростання, порушення сезонного розвитку, скорочення репродуктивної активності та погіршення стану популяцій. У поєднанні з підвищенням температурного фону це формує передумови до посилення аридизації середовища та зростання вразливості рідкісних видів рослин.

Аналіз сезонних трендів атмосферних опадів у Миколаєві та Первомайську показав, що на фоні майже незмінної тенденції щодо річної кількості опадів, спостерігається трансформація у перерозподілі опадів між сезонами року (рис. 5). Для весни в обох пунктах встановлено негативні тренди (Миколаїв –0,070; Первомайськ –0,109), що свідчить про зменшення зволоження в один із найважливіших для рослин періодів року. Крім того варто додати що значно зменшує наявність вологи у грунті в цей період також і відсутність стабільного снігового покриву особливо протягом останніх 10 років. Для літа зміни є незначними й різноспрямованими (Миколаїв зменшення, Первомайськ збільшення), однак за умов підвищення температур навіть відносно стабільні суми опадів не компенсують зростання випаровуваності.

Для осені та зими характерні позитивні тренди, особливо для осіннього періоду (Миколаїв +0,126; Первомайськ +0,263), що вказує на збільшення опадів у другій половині року. Таким чином, сучасна

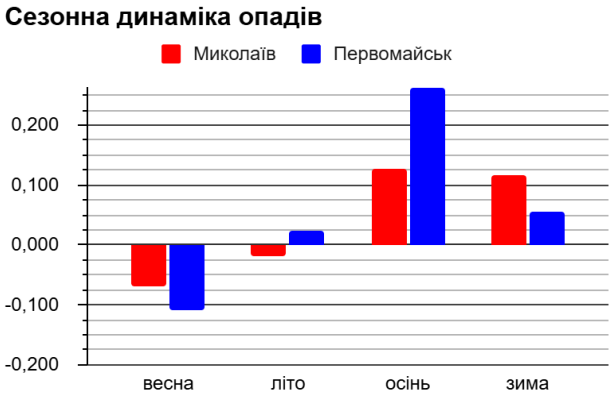


Рис. 5. Зміна кількості опадів по сезонах року

трансформація режиму опадів проявляється не стільки у зміні їх загальної кількості, скільки у зсуві вологозабезпечення на менш критичні для рослин сезони, що може посилювати кліматичний ризик для раритетної фітобіоти Миколаївської області.

Отже, однією з найважливіших у екологічному відношенні ознак сучасної трансформації клімату є поєднання підвищення температури повітря, подовження теплого періоду року та змін у режимі атмосферних опадів. Найбільш суттєвим наслідком цих процесів є зменшення вологозабезпечення у весняний період на тлі збільшення кількості опадів і потепління восени та взимку, що призводить до часової невідповідності між потребами рослин у волозі і теплі та фактичним їх надходженням. У зв'язку з цим подальший аналіз було зосереджено на оцінці потенційної чутливості раритетних видів до сучасних кліматичних змін з урахуванням їхніх екологічних вимог.

Аналіз екологічних вимог раритетних видів флори II та III категорій Червоної книги України, поширених у межах Миколаївської області, показав, що виявлені кліматичні зміни мають для них нерівнозначний, часто негативний вплив. Найбільш критичними кліматичними чинниками в сучасних умовах виступають зменшення весняного зволоження, зростання літніх температурних максимумів, підвищення частоти посушливих періодів, а також пом'якшення зимового режиму, яке може змінювати природний ритм сезонного розвитку окремих видів.

За результатами аналізу досліджені види доцільно умовно поділити на кілька груп кліматичної вразливості залежно від їхньої чутливості до температурних і гідротермічних змін (табл. 1), де 1 – найвищий рівень кліматичної вразливості, 2 – високий, 3 – помірний.

1. Найбільш вразлива група – ранньовесняні види. До цієї групи належать види, життєвий цикл яких значною мірою залежить від ранньовесняного зволоження, помірного температурного режиму та стабільності сезонного ходу погоди. Насамперед це півники понтичні (*Iris pontica*), тюльпан бузький (*Tulipa hypanica*), тюльпан Шренка (*Tulipa schrenkii*), брандушка різнокольорова (*Bulbocodium versicolor*), а також шоломниця весняна (*Scutellaria verna*) і зморшок степовий (*Morchella stepicola*).

2. Види з високою чутливістю до весняно-літніх посух. Цю групу формують степові та петрофітні види, які загалом є адаптованими до умов недостатнього зволоження, однак залишаються чутливими до тривалих або екстремальних посух у весняно-літній період, особливо в фазах активного росту та цвітіння. До цієї групи належать астрагал Геннінга (*Astragalus henningii*), астрагал одеський (*Astragalus odessanus*), астрагал понтійський (*Astragalus ponticus*), астрагал шерстистоквітковий (*Astragalus dasyanthus*), зіновать гранітна (*Chamaecytisus graniticus*), карагана скіфська (*Caragana scythica*), пустельниця головчаста (*Eremogone cephalotes) та пирій ковилолистий (Elytrigia stipifolia).*

3. Види, чутливі до порушення сезонного ритму розвитку та специфічно вразливі види, пов'язані з вологістю субстрату. До цієї групи ми можемо включити види, для яких ризик пов'язаний не лише з дефіцитом вологи або перегрівом, а й із порушенням звичного річного ритму розвитку під впливом м'яких зим і зміщення термінів настання теплих періодів. Крім того вони можуть бути адаптовані до сухих степових умов, але вразливі до посилення кліматичних екстремумів. Найбільш показовими в цьому відношенні є ковила найкрасивіша (*Stipa pulcherrima*), ковила вузьколиста (*Stipa tirsa Steven*), ковила шорстка (*Stipa asperella Klokov et Ossycz*). За ступенем вразливості ми віднесли сюди і види, чутливі не стільки до загального кліматичного фону, скільки до локального водного режиму місцезростань. Найбільш виразним прикладом є лептогій Шредера (*Leptogium schraderi*), для якого критичним чинником є висихання субстрату та зниження вологості мікросередовища.

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

Таблиця 1

Екологічні характеристики та групи кліматичної вразливості раритетних видів фітобіоти Миколаївської області

Вид (укр.)	Латинська назва	Критичний сезон	Критичні умови	Групи вразливості
Астрагал Геннінга	Astragalus henningii (Stev.) Boriss.	Весна початок літа	Літні посухи	2
Астрагал одеський	Astragalus odessanus Besser	Весна	Дефіцит вологи	2
Астрагал понтійський	Astragalus ponticus Pall.	Весна–літо	Посухи	2
Астрагал шерсти- стоквітковий	Astragalus dasyanthus Pall.	Весна (цвітіння)	Тривалі посухи	2
Зіновать гранітна	Chamaecytisus graniticus (Rehmann) Rothm.	Весна–початок літа	Посухи	2
Карагана скіфська	Caragana scythica (Kom.) Pojark.	Весна–літо	Дефіцит вологи	2
Пустельниця головчаста	Eremogone cephalotes (M.Bieb.)	Весна	Екстремальні посухи	2
Шоломниця весняна	Scutellaria verna Besser	Рання весна	Весняні посухи	1
Пирій ковилолистий	Elytrigia stipifolia (Czern. ex Nevski) Nevski	Весна–початок літа	Весняне зволоження	2
Ковила найкрасивіша	Stipa pulcherrima K.Koch	Весна початок літа	Посухи	3
Ковила вузьколиста	Stipa tirsa Steven	Весна	Тривалі посухи	3
Ковила шорстка	Stipa asperella Klokov et Ossycz.	Весна–літо	Дефіцит вологи	3
Півники понтичні	Iris pontica Zapal.	Рання весна	Екстремальні посухи	1
Тюльпан бузький	Tulipa hypanica Klokov et Zoz	Рання весна (цвітіння)	Весняні посухи	1
Тюльпан Шренка	Tulipa schrenkii Regel	Рання весна	Весняні посухи	1
Брандушка різнокольорова	Bulbocodium versicolor (Ker-Gawl.) Spreng.	Дуже рання весна	Дефіцит весняної вологи	1
Зморшок степовий	Morchella stepicola Zerova	Весна	Весняні посухи, випас	1
Лептогій Шредера	Leptogium schraderi (Ach.) Nyl.	Весна–осінь	Висихання субстрату	3

Головні висновки.

1. У межах Миколаївської області за досліджуваний період встановлено чітко виражений тренд до потепління, що простежується у зростанні середньорічної температури повітря, підвищенні весняних і осінніх температур, зростанні літніх максимумів і пом'якшені зимового режиму.

2. Виявлено, що для сучасних кліматичних змін в регіоні характерним є не лише загальне потепління, а й перебудова сезонного режиму атмосферних опадів: на тлі відсутності вираженої тенденції річної суми опадів спостерігається зменшення весняного зволоження та збільшення опадів восени й узимку.

3. Найбільш екологічно значущим наслідком виявлених змін є формування часової невідповідності між сезонною потребою рослин у волозі та фактичним режимом її надходження, що особливо небезпечно для видів із коротким вегетаційним циклом і вузькою екологічною амплітудою.

4. Найвищу кліматичну вразливість серед досліджених видів мають ранньовесняні раритетні рослини, а також види, чутливі до весняно-літніх посух і порушення сезонного ритму розвитку.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати можуть бути використані як основа для продовження моніторингу стану раритетної фітобіоти Миколаївської області та оцінки ризиків її збереження в умовах сучасних кліматичних змін. Вони також можуть бути застосовані для визначення пріоритетних напрямів природоохоронної діяльності, зокрема щодо збереження вразливих видів, які є найбільш чутливими до змін температурного режиму та характеру зволоження. Результати дослідження можна використовувати у розробці регіональних стратегій адаптації до змін клімату, а також у практиці управління природоохоронними територіями та плануванні заходів з відновлення степових екосистем.

Література

1. Cabral J., Jeltsch F., Thuiller W. et al. Impacts of past habitat loss and future climate change on the range dynamics of South African Proteaceae. Diversity and Distributions. 2012. DOI: 10.1111/ddi.12011.
2. Bakkenes M., Alkemade J.R.M., Ihle F., Leemans R., Latour J.B. Assessing effects of forecasted climate change on the diversity and distribution of European higher plants for 2050. Global Change Biology. 2002. Vol. 8, No. 4. P. 390–407. DOI: 10.1046/J.1354-1013.2001.00467.X
3. Overall Climate Change Impact Assessment for Ukraine. Ukrainian Climate Office. Київ, 2024. URL: https://ukrainian-climate-office.org/wp-content/uploads/2024/12/Overall-climate-change-impact-assessment.pdf (дата звернення: 29.01.2026).
4. Браславська О. В., Грицик О. М., Рожі Т. А. Вплив кліматичних змін на просторовий розподіл та властивості ґрунтів у степовій зоні України. Просторовий розвиток. 2025. Вип. 11. С. 557–573. DOI: 10.32347/2786-7269.2025.11.557-573.
5. Патика М. В., Патика В. П. Сучасні проблеми біорізноманітності і зміни клімату. Вісник аграрної науки. 2014. № 6. С. 5–10. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vaan_2014_6_3 .
6. Дідух Я. П. Екологічні аспекти глобальних змін клімату: причини, наслідки, дії. Вісник Національної академії наук України. 2009. № 2. С. 34–44. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vnanu_2009_2_12 .
7. Мойсієнко І. І. Зміна флори та рослинності півдня України у зв'язку з опустелюванням. Матеріали семінару щодо затвердження Національної доповіді про впровадження в Україні Конвенції ООН про боротьбу з опустелюванням (Київ, 20–22 листопада 2007 р.). Київ : Фітосоціоцентр, 2007. С. 70–74.
8. Лялько В. І., Єлістратова Л. О., Апостолов О. А. Використання даних наземного та космічного моніторингу для аналізу сучасних змін клімату в Україні. Український журнал дистанційного зондування Землі. 2014. № 1. С. 20–24. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ukjdzz_2014_1_7.
9. ERA5 monthly averaged data on single levels [Електронний ресурс]. Copernicus Climate Data Store (CDS). Режим доступу: https://cds.climate.copernicus.eu/ (дата звернення: 29.01.2026).
10. NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER): Data Access Viewer URL: https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/ (дата звернення: 29.01.2026).
11. Український гідрометеорологічний інститут. Картографічні матеріали кліматичних даних України URL: https://maps.uhmi.org.ua/ (дата звернення: 29.01.2026).
12. Патрушева Л., Возіян А., Учень Т. Температурна динаміка як чинник трансформації природних ландшафтів Причорноморського степу. Степ: досвід збереження : зб. матер. II наук.-практ. семінару (30 травня 2025 року). Чернівці : Друк Арт, 2025. С. 76–79. Режим доступу: https://uncg.org.ua/wp-content/uploads/2025/10/step_dosvid_zberezhennya_2.pdf .
13. Patrusheva L., Niepieina H., Uchen T. Analysis of the Dynamics of Atmospheric Air Temperature in Mykolaiv. Proceedings of the International Conference «European Green Dimensions: Fundamental, Applied, and Industrial Aspects», June 5–7, 2025, Mykolaiv Mykolaiv : PMBSNU, 2025. P. 71. URL: https://www.researchgate.net/publication/392588629_Proceedings_of_the_International_Conference_European_Green_Dimensions_Fundamental_Applied_and_Industrial_Aspects_June_5-7_2025_Mykolaiv_Mykolaiv_PMBSNU_2025_100_p

Дата першого надходження статті до видання: 30.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

UDC 502;504
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.50

EARTH OBSERVATION FOR ASSESSING ENVIRONMENTAL IMPACTS OF WAR IN UKRAINE: TRANSBOUNDARY RISKS AND MONITORING APPROACHES

Gorobei M.S.
Institute of Ecological Renovation and Development of Ukraine
35 Mytropolyta Vasylya Lypkivskoho St., 03035, Kyiv
maryna.gorobei@gmail.com

The full-scale war in Ukraine caused significant environmental damage affecting atmospheric systems, water resources, soils, ecosystems, biodiversity, and environmental safety at both national and transboundary levels. Military operations, destruction of industrial infrastructure, fires, fuel combustion, chemical contamination, and damage to hydraulic structures created complex environmental risks extending beyond national borders. Under wartime conditions, traditional environmental monitoring systems often face serious limitations due to restricted territorial access, damaged infrastructure, safety constraints, and interruptions in field observations. In this context, Earth Observation technologies become critically important instruments for environmental assessment, monitoring, and evidence generation.

The article examines the role of satellite Earth Observation technologies in assessing war-related environmental impacts in Ukraine. Particular attention is devoted to transboundary environmental risks associated with atmospheric pollution transport, contamination of international river basins, marine pollution in the Black Sea region, and ecosystem degradation affecting neighbouring countries. The study analyses the potential of modern remote sensing instruments and environmental monitoring platforms, including Sentinel-5P, Copernicus services, NASA atmospheric products, and geospatial environmental intelligence tools for detecting environmental anomalies and supporting environmental assessment under conflict conditions.

The research highlights the importance of integrating Earth Observation data into environmental governance, environmental security frameworks, post-war recovery planning, and sustainable development strategies. The article also demonstrates that satellite monitoring technologies provide opportunities for objective, large-scale, and continuous environmental observations in inaccessible or high-risk territories. The proposed conceptual framework emphasises the growing importance of remote sensing technologies for documenting environmental consequences of war, supporting environmental accountability, and strengthening international environmental cooperation. The study contributes to the development of interdisciplinary approaches combining environmental science, geospatial technologies, environmental security, and sustainable recovery planning under conditions of armed conflict. *Key words:* Earth Observation, environmental impacts of war, Ukraine, transboundary pollution, remote sensing, environmental monitoring, environmental security, sustainable recovery, Sentinel-5P, Copernicus, war-related pollution.

Earth observation for assessing environmental impacts of war in Ukraine: transboundary risks and monitoring approaches. Горобей М.С.

Повномасштабна війна в Україні завдала значних екологічних збитків, негативно вплинувши на атмосферне повітря, водні ресурси, ґрунти, екосистеми, біорізноманіття та екологічну безпеку як на національному, так і на транскордонному рівнях. Воєнні дії, руйнування промислової інфраструктури, пожежі, спалювання пального, хімічне забруднення та пошкодження гідротехнічних об'єктів формують комплексні екологічні ризики, наслідки яких виходять за межі території України. В умовах війни традиційні системи екологічного моніторингу часто функціонують із суттєвими обмеженнями через обмежений доступ до територій, руйнування інфраструктури, безпекові ризики та неможливість проведення польових досліджень. У такому контексті технології Earth Observation стають критично важливими інструментами екологічної оцінки, моніторингу та формування доказової бази.

Окреслено значення супутникових технологій Earth Observation у вивченні та оцінці воєнно-обумовлених екологічних впливів в Україні. Особливу увагу приділено транскордонним екологічним ризикам, пов'язаними із забрудненням та перенесенням атмосферного повітря, негативним станом міжнародних річкових басейнів, морським забрудненням у басейні Чорного моря та деградацією екосистем, що впливають на сусідні держави. Проаналізовано потенціал сучасних інструментів дистанційного зондування Землі та платформ екологічного моніторингу, зокрема Sentinel-5P, сервісів Copernicus, атмосферних продуктів NASA та геоінформаційних систем екологічного аналізу для виявлення екологічних аномалій, здійснення екологічної оцінки в умовах збройного конфлікту.

У праці означена важливість інтеграції даних Earth Observation у системи екологічного управління, екологічної безпеки, планування післявоєнного відновлення та забезпечення сталого розвитку. Наголошено, що супутниковий моніторинг забезпечує можливість здійснення об'єктивних, масштабних та безперервних екологічних спостережень на територіях з обмеженим доступом або підвищеним рівнем небезпеки. Запропонований концептуальний підхід акцентує увагу на зростаючій ролі

© Gorobei M.S., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

технологій дистанційного зондування у документуванні екологічних наслідків війни, підтримці екологічної відповідальності та розвитку міжнародного екологічного співробітництва. Стаття робить внесок у розвиток міждисциплінарних підходів, що поєднують екологічну науку, геоінформаційні технології, екологічну безпеку та підходи до сталого післявоєнного відновлення в умовах збройного конфлікту. *Ключові слова:* Earth Observation, екологічні наслідки війни, Україна, транскордонне забруднення, дистанційне зондування Землі, екологічний моніторинг, екологічна безпека, стале відновлення, Sentinel-5P, Copernicus, воєнно-обумовлене забруднення.

Problem Statement. The full-scale war in Ukraine caused significant environmental impacts affecting atmospheric systems, water resources, soils, ecosystems, biodiversity, and environmental safety at both national and transboundary levels. Military operations are accompanied by industrial fires, destruction of energy infrastructure, contamination of river basins, emissions of hazardous substances, ecosystem degradation, and the generation of large volumes of demolition waste. Many of these impacts have long-term and transboundary consequences, creating environmental risks not only for Ukraine but also for neighbouring countries and shared regional ecosystems, including the Black Sea basin.

Under wartime conditions, traditional environmental monitoring approaches face serious limitations due to restricted territorial access, safety risks, damaged monitoring infrastructure, and the impossibility of conducting systematic field observations. This creates the need for alternative environmental assessment tools capable of providing operational, large-scale, and objective environmental information. In this context, Earth Observation technologies and satellite remote sensing become increasingly important instruments for assessing environmental impacts under armed conflict conditions.

Relevance of the Study. The relevance of the study is determined by the growing need to develop modern approaches for assessing war-related environmental impacts and establishing scientifically grounded environmental monitoring frameworks under conditions of armed conflict. The war in Ukraine demonstrated that environmental consequences of military activities may extend far beyond local territories and affect regional environmental security, public health, water quality, food systems, biodiversity, and sustainable development processes.

At the same time, Earth Observation technologies have significantly expanded the possibilities for environmental monitoring by enabling continuous and independent observations of inaccessible or high-risk territories. Satellite monitoring systems provide opportunities for detecting atmospheric pollution, monitoring fires and industrial accidents, assessing ecosystem degradation, analysing water contamination, and identifying environmental anomalies at regional and transboundary scales. The integration of geospatial technologies into environmental assessment processes therefore becomes increasingly important for environmental governance, environmental accountability, and post-war recovery planning.

Connection of the Author's Work with Important Scientific and Practical Tasks. The author's work is connected with current scientific and practical tasks related to environmental security, environmental impact assessment, sustainable recovery, and the application of Earth Observation technologies for environmental monitoring under wartime conditions. The study contributes to the development of interdisciplinary approaches combining environmental science, remote sensing, geospatial analysis, and environmental governance.

The research also addresses practical challenges associated with documenting environmental damage, supporting environmental monitoring in inaccessible territories, strengthening transboundary environmental assessment, and improving the scientific basis for sustainable post-war recovery strategies. The proposed conceptual framework may support decision-making processes in the fields of environmental policy, environmental monitoring, ecological restoration, and international environmental cooperation.

Analysis of Recent Research and Publications. Recent scientific studies increasingly focus on the environmental consequences of armed conflicts and the growing role of remote sensing technologies in environmental assessment. International organisations, including UNEP, the European Environment Agency, NASA, ESA, and Copernicus services, emphasise the importance of satellite monitoring for detecting pollution events, assessing ecosystem degradation, and monitoring atmospheric changes under crisis conditions [1–4].

Several studies demonstrate the potential of Sentinel-5P TROPOMI data for monitoring atmospheric pollutants such as nitrogen dioxide (NO_2), sulfur dioxide (SO_2), carbon monoxide (CO), aerosols, and methane emissions [5–7]. Other researchers highlight the importance of geospatial intelligence and Earth Observation technologies for assessing environmental risks associated with industrial accidents, wildfires, infrastructure destruction, and water contamination during military conflicts [8–10].

At the same time, current literature mainly focuses on individual environmental components or specific technical applications of remote sensing technologies. Comprehensive interdisciplinary approaches integrating transboundary environmental risks, Earth Observation technologies, and sustainable recovery perspectives remain insufficiently developed.

Identification of Previously Unresolved Aspects of the Overall Problem. Despite the growing number of studies dedicated to environmental impacts of war and satellite environmental monitoring, several important

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

aspects remain insufficiently addressed. Existing research often concentrates on isolated environmental components, such as atmospheric pollution or infrastructure damage, without considering the systemic and interconnected nature of wartime environmental impacts.

Limited attention is also devoted to the transboundary dimension of environmental risks associated with military activities and to the integration of Earth Observation technologies into broader environmental governance and sustainable recovery frameworks. Furthermore, there is still a lack of conceptual approaches combining environmental assessment, transboundary environmental security, remote sensing technologies, and post-war environmental recovery within a unified analytical framework.

Novelty. The scientific novelty of the study lies in the development of an integrated conceptual framework for assessing war-related environmental impacts through the application of Earth Observation technologies and transboundary environmental analysis. The article systematises the main categories of environmental impacts caused by war in Ukraine and demonstrates the role of satellite monitoring technologies in supporting environmental assessment under conditions of restricted territorial access and environmental uncertainty.

The study also proposes an interdisciplinary approach combining environmental science, geospatial technologies, environmental security, and sustainable recovery perspectives for analysing environmental consequences of armed conflicts.

Methodological or General Scientific Significance. The methodological significance of the study lies in the development of an interdisciplinary analytical approach integrating Earth Observation technologies, environmental assessment, transboundary environmental analysis, and sustainable recovery perspectives within the context of armed conflict. The proposed framework demonstrates the potential of satellite monitoring technologies for supporting environmental assessment under conditions where conventional monitoring systems become limited or partially inaccessible.

The study also contributes to the broader scientific discussion regarding the role of remote sensing technologies in environmental governance, environmental security, and post-conflict environmental management. The integration of geospatial environmental intelligence into environmental assessment processes may strengthen scientific decision-making, improve environmental accountability mechanisms, and support evidence-based recovery planning. Furthermore, the research highlights the growing importance of Earth Observation technologies for assessing complex environmental interactions across atmospheric, hydrological, terrestrial, and ecosystem components at regional and transboundary scales.

Presentation of the Main Material

Environmental Impacts of War in Ukraine

The environmental consequences of the war in Ukraine represent a complex and multidimensional environmental crisis affecting atmospheric systems, water resources, soils, ecosystems, biodiversity, and environmental security at both national and transboundary scales. Military activities generate interconnected environmental pressures associated with industrial destruction, hazardous emissions, ecosystem degradation, infrastructure damage, and long-term environmental contamination [11–13].

One of the most significant environmental challenges relates to atmospheric pollution caused by industrial fires, explosions, fuel combustion, and damage to energy infrastructure. Large-scale fires release particulate matter, greenhouse gases, toxic compounds, nitrogen oxides, sulfur compounds, and combustion-related pollutants capable of affecting both environmental quality and public health. Environmental risks further increase in regions characterised by dense industrial infrastructure and hazardous industrial facilities.

Water contamination also represents a major environmental challenge under wartime conditions. Damage to wastewater treatment systems, industrial sites, hydraulic infrastructure, and river ecosystems may contribute to deterioration of water quality and increased ecological risks for aquatic systems. In addition, contamination of river basins connected to transboundary water systems creates broader regional environmental threats affecting neighbouring territories and marine ecosystems [14].

Military activities additionally contribute to soil degradation and ecosystem disturbance. Heavy metal contamination, explosive residues, landmine pollution, destruction of vegetation cover, habitat fragmentation, and biodiversity loss significantly reduce ecological resilience and complicate future environmental restoration processes.

The environmental consequences of war should therefore be understood not as isolated environmental incidents but as interconnected systemic impacts generating cumulative long-term environmental risks affecting environmental security, public health, sustainable development, food systems, and ecological resilience [15].

Military activities in Ukraine generated significant environmental pressures affecting atmospheric systems, water resources, soils, ecosystems, and biodiversity. According to the Joint Research Centre report on the status of environment and climate in Ukraine (Belis et al., 2025), war-related military operations generated approximately 77 $MtCO_2$-eq during the first eighteen months of the full-scale invasion [16]. Simultaneously, large-scale destruction of industrial facilities, energy infrastructure, oil depots, and military operations contributed to substantial atmospheric pollution and environmental degradation across multiple regions of Ukraine.

Particular concern is associated with large-scale land and soil degradation caused by military activities. Recent environmental assessments indicate that approximately 10.5 million hectares of Ukrainian land, representing nearly 40% of the country's territory, are vulnerable to degradation processes intensified by warfare, including soil contamination, crater formation, fires, heavy metal accumulation, and explosive remnants of war [17, 18]. Such environmental degradation creates long-term risks for agricultural productivity, ecosystem recovery, food security, and sustainable land management in post-war Ukraine.

The environmental consequences additionally extend beyond national borders. Pollutants released during industrial fires, explosions, fuel combustion, and infrastructure destruction may spread through atmospheric transport pathways and river basin systems, creating transboundary environmental risks for neighbouring countries and the Black Sea region [19].

Transboundary Environmental Risks

The transboundary nature of environmental pollution represents one of the most significant characteristics of war-related environmental impacts. Atmospheric pollutants generated by industrial fires, explosions, and combustion processes may spread across extensive geographical distances depending on meteorological conditions and atmospheric circulation dynamics [20, 21].

Environmental consequences generated within conflict zones may therefore affect neighbouring countries and regional ecosystems beyond national territorial boundaries. Such transboundary risks are particularly relevant in regions characterised by interconnected atmospheric circulation systems, shared river basins, and marine ecosystems.

The Black Sea region represents a particularly vulnerable environmental system due to the interconnected nature of river basins, marine systems, and atmospheric transport pathways. Pollution transported through the Dnipro, Dniester, and Danube river systems may contribute to regional ecological degradation and increased environmental risks for coastal and marine ecosystems.

In addition to atmospheric and hydrological impacts, transboundary environmental consequences may affect biodiversity corridors, migratory species, protected ecosystems, and regional ecological connectivity. Such environmental interactions demonstrate that wartime environmental impacts require coordinated international monitoring approaches and strengthened transboundary environmental governance mechanisms [22–25].

Monitoring Challenges under Wartime Conditions

Environmental monitoring during armed conflicts faces substantial operational, technical, and methodological limitations. Active military operations, restricted territorial access, damaged infrastructure, occupation of territories, and safety risks significantly limit the possibility of conducting field observations and conventional environmental assessments [16, 26].

In many affected regions, environmental monitoring stations may be damaged, destroyed, or temporarily unavailable, resulting in fragmented environmental datasets and reduced monitoring continuity. Additional challenges emerge due to the dynamic nature of wartime environmental impacts, including industrial fires, explosions, flooding events, infrastructure destruction,



Fig. 1. Environmental impacts of war in Ukraine: key environmental dimensions and systemic risks (developed by author based on Belis et al., 2025; UNEP, 2022; FAO; IUCN and environmental assessment materials)

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

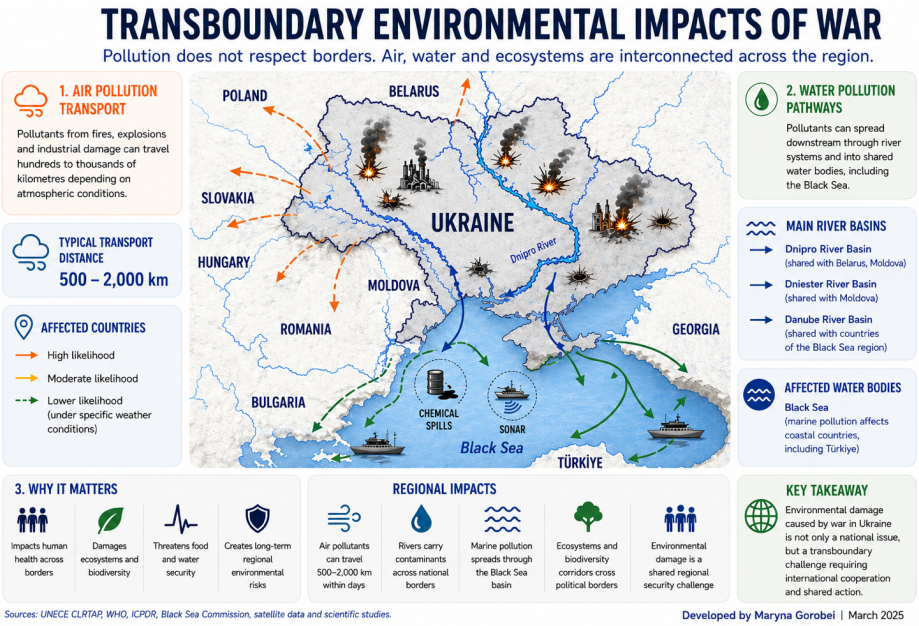


Fig. 2. Transboundary environmental impacts of war: atmospheric transport pathways, shared river basins, and regional environmental risks (developed by author based on UNECE, WHO, ICPDR, Black Sea Commission and scientific sources)

and hazardous emissions occurring across extensive geographical territories [27, 28].

Under such conditions, timely access to reliable environmental information becomes critically important for environmental risk assessment, emergency response, environmental governance, and sustainable recovery planning. These limitations significantly increase the importance of alternative monitoring approaches capable of providing large-scale environmental observations independent of local infrastructure conditions.

Earth Observation technologies therefore become essential tools for environmental assessment under wartime conditions. Satellite monitoring systems provide opportunities for detecting environmental anomalies, monitoring ecosystem changes, identifying pollution events, and supporting evidence-based environmental analysis in inaccessible or high-risk territories [3, 4].

Role of Earth Observation Technologies

Earth Observation technologies play an increasingly important role in environmental monitoring and environmental assessment under conditions of armed conflict and environmental instability. Unlike conventional monitoring systems, satellite-based observations provide continuous, objective, and spatially extensive environmental information regardless of accessibility limitations or damaged infrastructure [4, 5, 21].

Modern Earth Observation systems support the monitoring of atmospheric pollution, wildfire activity, water contamination, vegetation degradation, land-use changes, infrastructure destruction, and ecosystem disturbances. Satellite platforms such as Sentinel-5P, Sentinel-2, Landsat, MODIS, and Copernicus services provide environmental datasets that may be integrated into environmental monitoring and decision-making processes.

Particular significance is associated with the capability of remote sensing technologies to identify environmental anomalies resulting from military activities. Atmospheric monitoring instruments enable the observation of pollution transport pathways, combustion-related emissions, and aerosol distribution, while optical and radar imagery support the assessment of damaged infrastructure, flooded territories, and ecosystem fragmentation.

The integration of Earth Observation technologies into environmental assessment processes significantly improves environmental situational awareness and strengthens evidence-based environmental governance. Satellite monitoring additionally supports long-term environmental assessment and contributes to the development of sustainable recovery strategies for conflict-affected regions.

To better systematise the role of Earth Observation technologies in wartime environmental assessment, Table 1 presents the relationship between major categories of environmental impacts, monitoring challenges under conflict conditions, and applicable satellite and airborne monitoring approaches. The proposed framework demonstrates how different Earth Observation technologies may support operational environmental monitoring, rapid environmental assessment, and long-term environmental recovery planning in conflict-affected territories.

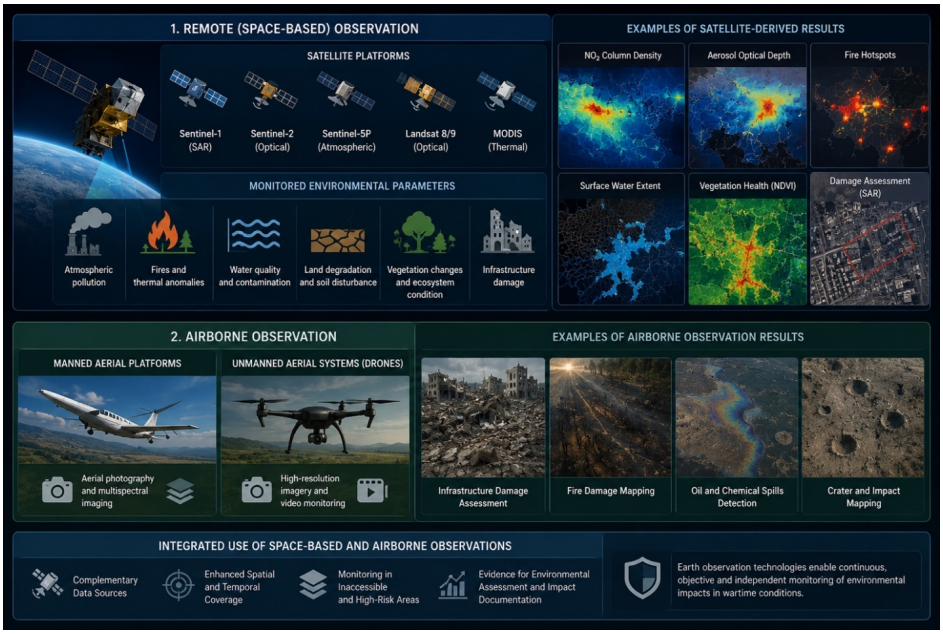


Fig. 3. Earth Observation technologies for environmental monitoring and assessment under wartime conditions (developed by author based on Copernicus, NASA Earth Observatory, ESA and environmental monitoring frameworks)

Table 1

Application of Earth Observation technologies for wartime environmental monitoring

Environmental impact category	Monitoring challenges under wartime conditions	Applicable Earth Observation technologies	Potential monitoring outputs
Atmospheric pollution	Restricted field access, damaged monitoring stations	Sentinel-5P, TROPOMI, CAMS	NO_2, SO_2, aerosol and fire-related atmospheric anomalies
Industrial and infrastructure damage	Inaccessible territories, active combat zones	Sentinel-2, SAR, drone imagery	Damage mapping, thermal anomalies, burned areas
Water contamination	Limited sampling possibilities, destroyed infrastructure	Sentinel-2, Landsat, SAR	Flood mapping, turbidity, oil spills, water quality changes
Soil and land degradation	Landmine contamination, unsafe territories	NDVI analysis, multispectral imagery	Vegetation stress, degraded land, ecosystem fragmentation
Ecosystem disturbance	Restricted biodiversity monitoring	MODIS, Sentinel-2	Forest loss, habitat fragmentation, wildfire assessment

The presented classification demonstrates that Earth Observation technologies provide significant advantages for environmental assessment under wartime conditions, particularly in territories with restricted physical accessibility and damaged monitoring infrastructure. Satellite observations, airborne monitoring systems, and geospatial analytical tools enable continuous large-scale environmental monitoring and support rapid identification of environmental anomalies, pollution hotspots, ecosystem disturbances, and infrastructure-related environmental risks. Consequently, Earth Observation technologies become essential instruments for operational environmental assessment and evidence-based environmental governance during armed conflicts.

Applications of Earth Observation for Environmental Assessment

The practical applications of Earth Observation technologies for wartime environmental assessment continue to expand due to advances in satellite monitoring capabilities and geospatial analytical methods. One of the most important applications involves atmospheric pollution monitoring and assessment of pollutant transport processes. Satellite observations enable identification of large-scale atmospheric anomalies associated with industrial fires, explosions, and combustion-related emissions.

Remote sensing technologies are also widely applied for wildfire detection and burned area assessment.

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

Thermal anomaly monitoring and multispectral satellite imagery support rapid identification of fire locations, estimation of burned territories, and evaluation of ecosystem damage.

Another important application concerns water resource monitoring and contamination assessment. Satellite observations support identification of flooded areas, sediment transport, water quality changes, and environmental impacts associated with damaged hydraulic infrastructure. Earth Observation technologies additionally provide opportunities for monitoring coastal ecosystems and marine environmental conditions within the Black Sea region.

Land degradation assessment represents another significant application area. Remote sensing technologies enable monitoring of vegetation stress, soil degradation, land cover changes, and ecosystem fragmentation caused by military activities. Geospatial analysis additionally supports identification of environmentally vulnerable territories requiring ecological restoration and environmental remediation.

The integration of multiple environmental datasets significantly improves the analytical capabilities of Earth Observation systems and contributes to the development of environmental intelligence approaches supporting sustainable environmental management and post-war recovery planning.

Earth Observation for Environmental Recovery and Sustainable Development

Earth Observation technologies may significantly contribute to environmental recovery processes and sustainable reconstruction strategies in post-war Ukraine. Reliable environmental information is essential for identifying priority recovery areas, assessing environmental damage, supporting ecological restoration, and strengthening environmental resilience.

Satellite monitoring systems provide opportunities for long-term environmental assessment and evaluation of ecosystem recovery dynamics over time. Continuous environmental observations support monitoring of vegetation restoration, water quality improvement, land rehabilitation, and effectiveness of environmental remediation measures.

Earth Observation data may additionally support climate adaptation planning and sustainable land-use management by identifying environmentally vulnerable territories and assessing environmental risks associated with future development scenarios.

Another important aspect concerns environmental governance and international environmental cooperation. Satellite observations provide transparent and scientifically grounded environmental information supporting environmental accountability mechanisms, international reporting processes, and transboundary environmental cooperation initiatives.

Consequently, Earth Observation technologies should be considered not only as monitoring instruments but also as strategic tools supporting sustainable development, environmental resilience, evidence-based environmental governance, and environmentally responsible post-war recovery planning.

Main Conclusions. The conducted study demonstrates that the environmental impacts of war in Ukraine represent a complex and interconnected system of atmospheric, hydrological, terrestrial, and ecological disturbances with significant long-term and transboundary consequences. Military activities generate environmental risks extending beyond directly affected territories and influencing regional environmental security, ecosystem stability, and sustainable development processes.

The research confirms that conventional environmental monitoring approaches are often insufficient under wartime conditions due to restricted physical access to territories, damaged monitoring infrastructure, and security limitations. In this context, Earth Observation technologies provide substantial scientific and practical advantages for operational environmental assessment and long-term environmental monitoring.

The study additionally demonstrates that satellite observations, airborne monitoring systems, and geospatial analytical approaches may support the detection of atmospheric anomalies, pollution transport pathways, ecosystem degradation, land disturbance, water contamination, and infrastructure-related environmental risks. Earth Observation technologies therefore become essential instruments for evidence-based environmental governance and environmental damage assessment during armed conflicts.

Particular importance is associated with the capability of Earth Observation systems to support monitoring in inaccessible or high-risk territories where traditional field investigations remain limited or impossible. Satellite monitoring enables continuous large-scale environmental observations and contributes to transparent environmental assessment and international environmental cooperation.

Overall, the study confirms that Earth Observation technologies should be considered strategic tools for environmental security, post-war environmental recovery, sustainable development planning, and strengthening environmental resilience in Ukraine.

Prospects for the Application of the Study Results. The presented research may serve as a conceptual and methodological foundation for further investigations dedicated to wartime environmental monitoring, environmental security assessment, and post-war ecological recovery in Ukraine.

Future studies may focus on the integration of satellite observations with atmospheric transport modelling, geographic information systems (GIS), field-based environmental measurements, and environmental risk assessment methodologies for the development of comprehensive environmental monitoring frameworks under conflict conditions.

A particularly promising direction remains the application of high-resolution Earth Observation data for detailed assessment of atmospheric pollution dynamics, wildfire impacts, land degradation, water contamination, biodiversity disturbances, and infrastructure-related environmental risks in war-affected territories.

The obtained results may additionally support the development of national environmental monitoring systems, post-war environmental recovery programmes, climate adaptation strategies, environmental governance mechanisms, and international environmental cooperation initiatives.

The methodological approaches presented in the study may also be adapted for environmental assessment in other regions affected by military conflicts, technological disasters, or large-scale environmental emergencies where traditional environmental monitoring remains limited due to accessibility and security constraints.

References

1. United Nations Environment Programme (UNEP). The Environmental Impact of the Conflict in Ukraine: A Preliminary Review. Nairobi: UN Environment Programme, 2022. URL: https://www.unep.org/resources/report/environmental-impact-conflict-ukraine-preliminary-review.
2. European Environment Agency (EEA). Air Quality and Environmental Monitoring in Europe. Copenhagen: EEA, 2023. URL: https://www.eea.europa.eu.
3. European Space Agency (ESA). Sentinel-5P Mission Overview. URL: https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5p.
4. Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS). Atmospheric Composition Monitoring and Forecasting Products. URL: https://atmosphere.copernicus.eu/.
5. Veefkind J.P., Aben I., McMullan K., Förster H., de Vries J., Otter G., Claas J., Eskes H.J., de Haan J.F., Kleipool Q. et al. TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. Remote Sensing of Environment. 2012. Vol. 120. P. 70–83. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.027.
6. Turos O.I., Petrosian A.A., Maremukha T.P., Morhulova V.V., Brezitska N.V., Kobzarenko I.V., Tsarenok T.V. Assessment of Ambient Air Pollution by Particulate Matter (PM10, PM2.5) and Risk for Human Health Caused by War Actions. Wiadości Lekarskie. 2023. Vol. 76, No. 4. P. 738–744. DOI: https://doi.org/10.36740/WLek202304106.
7. Turos O.I., Petrosian A.A., Maremukha T.P., Morhulova V.V., Grabovets D.M., Brezitska N.V., Tsarenok T.V. Long-term trends (compared to the pre-war period) and public health impact of surface ozone in Ukraine. Wiadości Lekarskie. 2024. Vol. 77, No. 4. P. 703–709. DOI: https://doi.org/10.36740/WLek202404114.
8. Pereira P., Bašić F., Bogunovic I., Barcelo D. Russian–Ukrainian war impacts the total environment. Science of The Total Environment. 2022. Vol. 837. Article 155865. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155865.
9. Rawtani D., Gupta G., Khatri N., Rao P.K., Hussain C.M. Environmental damages due to war in Ukraine: A perspective. Science of The Total Environment. 2022. Vol. 850. Article 157932. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157932.
10. Almeida M., Soviev M., San-Miguel J., Durrant T., Oom D., Branco A., Ferrari D., Boca R. et al. (eds.) Report on the Large Wildfires of 2022 in Europe. Chapter 12: Wildfires in Ukraine in Times of War / Zibtsev S., Goldammer J.G., Myroniuk V., Sydorenko S., Soshenskyi O., Bogomolov V., Borsuk O. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2024. DOI: https://doi.org/10.2760/19760, JRC138859.
11. Belis C.A., Petrosian A., Turos O., Maremukha T., Morhulova V., Kona A., Djatkov D., Caudullo G., Ceccherini G., Beck P.S.A., San-Miguel J., Arias Navarro C., Wojda P., Jones A., Hanke G., Mariani G., Carravieri A. Status of Environment and Climate in Ukraine. European Commission: Joint Research Centre. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2025. DOI: https://doi.org/10.2760/6292177, JRC141480.
12. World Wide Fund for Nature (WWF). Assessing the Environmental Impacts of the War in Ukraine. 2022. URL: https://wwfcee.org/our-offices/ukraine/assessing-the-environmental-impacts-of-the-war-in-ukraine.
13. Harari S., Annesi-Maesano I. The war in Ukraine is an environmental catastrophe. The International Journal of Tuberculosis and Lung Disease. 2023. Vol. 27, No. 2. P. 94–95. URL: https://theunion.org/news/the-war-in-ukraine-is-an-environmental-catastrophe.
14. 14. Миронюк В., Вайнрайх А., фон Доскі В., Поллі Г., Діс М. Скільки лісових ресурсів у нас в Україні? Дані, методологія та результати інвентаризації лісів на основі дистанційного зондування 2023 року. Центр національної інвентаризації лісів України, 2024.
15. Полякова Л., Абрускато С. Підтримка відновлення та сталого управління українськими лісами та лісовим сектором України. Forest Europe. Бонн, 2023. URL: https://foresteurope.org/wp-content/uploads/2023/08/Supporting-the-recovery-and-sustainable-management-of-Ukrainian-forests-and-Ukraines-forest-sector-Final-report.pdf.
16. UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (CLRTAP). Geneva: United Nations Economic Commission for Europe. URL: https://unece.org/environment-policy/air.
17. Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS). Atmospheric Composition Monitoring and Forecasting Products. URL: https://atmosphere.copernicus.eu/.
18. NASA Earth Observatory. Remote Sensing Applications for Environmental Monitoring and Atmospheric Pollution Assessment. URL: https://earthobservatory.nasa.gov.
19. Black Sea Commission (Commission on the Protection of the Black Sea Against Pollution). State of the Environment of the Black Sea (2009–2014/5) / ed. Krutov A. Istanbul: BSC, 2019. ISBN: 978-605-84837-0-5.
20. International Commission for the Protection of the Danube River (ICPDR). Danube River Basin Management Plan. Vienna: ICPDR, 2021.

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

21. World Health Organization (WHO). Ambient Air Quality and Health. Fact sheet. Geneva: WHO, 2022. URL: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health.
22. Скок А., Хрутьба В., Рак О., Хлобістов Є. Якість повітря в Україні до та під час повномасштабного вторгнення. SaveDnipro. Київ, 2023. URL: https://www.savednipro.org/wp-
23. Сорока М., Трелевський О., Черноцова М. Запоріжжя: Якість повітря в умовах воєнного стану (Аналітична записка). Прага–Київ, 2022. URL: https://cleanair.org.ua/wp-content/uploads/2023/01/cleanair.org.ua-2022-zaporizhzhia-air-war-report-final.pdf.
24. World Bank; Government of Ukraine; European Commission; United Nations. Ukraine – Third Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA3): February 2022–December 2023. Washington DC: World Bank Group, 2024. URL: https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/099021324115085807.
25. IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the IPCC / Lee H., Romero J. (eds.). Geneva: IPCC, 2023. DOI: https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

Дата першого надходження статті до видання: 30.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Алексєєва Анна Олександрівна (Миколаїв) – кандидат технічних наук, доцент кафедри екології, Навчально-науковий медичний інститут Чорноморського національного університету імені Петра Могили, orcid.org/0000-0003-0345-8538;

Алпатова Оксана Миколаївна (Житомир) – кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедра екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка», orcid.org/0000-0003-0803-9850;

Алпатова Оксана Миколаївна (Житомир) – кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка», orcid.org/0000-0003-0803-9850;

Багрій Сергій Михайлович (Івано-Франківськ) – кандидат геологічних наук, доцент кафедри нафтогазової геофізики, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, orcid.org/0000-0003-1190-6222;

Бакуліч Олена Олександрівна (Київ) – кандидат технічних наук, професор, професор кафедри менеджменту, Національний транспортний університет, orcid.org/0000-0002-5700-0576;

Балакін Валерій Федорович (Дніпро) – доктор технічних наук, професор, професор Навчально-науковий інститут «Дніпровський металургійний інститут» Українського державного університету науки і технологій, orcid.org/0000-0003-0876-7516**;**

Бєлоконь Каріна Володимирівна (Запоріжжя) – кандидат технічних наук, доцент, заступник директора з наукової роботи, доцент кафедри металургійних технологій, екології та техногенної безпеки за сумісництвом, Інженерний навчально-науковий інститут імені Ю.М. Потебні Запорізького національного університету, orcid.org/0000-0003-2000-4052;

Білоконь Альона Олександрівна (Миколаїв) – кандидат історичних наук, експерт зі сталого розвитку і трансферу технологій, Регіональний акселераційний центр GCIP для інновацій, технологій та інноваційних стартапів у Миколаївській області, orcid.org/0000-0003-1644-4397;

Боброва Марія Сергіївна (Кропивницький) – кандидат біологічних наук, доцент, завідувач кафедри природничих наук та методик викладання, Центральноукраїнський державний університет імені Володимира Винниченка, orcid.org/0000-0001-7703-651X;

Бондар Олександр Іванович (Київ) – доктор біологічних наук, професор, академік Національної академії аграрних наук України, директор, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України», orcid.org/0000-0002-4488-2282;

Борисюк Борис Васильович (Житомир) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри екології, Поліський національний університет, orcid.org/0000-0003-1195-6000;

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;

Булковська Анастасія Геннадіївна (Житомир) – студентка I курсу факультету гірничої справи, природокористування та будівництва, Державний університет «Житомирська політехніка», orcid.org/0009-0002-1438-9398;

Волошин В'ячеслав Степанович (Дніпро) – доктор технічних наук, професор, професор по кафедрі промислової теплоенергетики, Приазовський державний технічний університет, orcid.org/0009-0005-6809-6779;

Волошина Наталія Олексіївна (Київ) – доктор біологічних наук, професор, професор кафедри хімії та екології, Український державний університет імені Михайла Драгоманова, orcid.org/0000-0002-9135-8539;

Галаган Оксана Костянтинівна (Кременець) – кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри біології, екології та методик їх навчання, Кременецька обласна гуманітарно-педагогічна академія імені Тараса Шевченка, orcid.org/0000-0001-6775-0752;

Горго Юрій Павлович (Київ) – доктор біологічних наук, професор, професор кафедри біоенергетики, біоінформатики та екобіотехнології, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», orcid.org/0000-0002-7353-7162;

Горобей Марина Сергіївна (Київ) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Центру із питань міжнародної діяльності, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України», orcid.org/0000-0002-9440-6807;

Гребенюк Тетяна Володимирівна (Київ) – кандидат технічних наук, доцент, доцент ка-федри геоінженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», orcid.org/0000-0002-9287-2919;

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

Григорчук Інна Дмитрівна (Кам'янець-Подільський) – кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри біології та екології, Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, orcid.org/0000-0002-2260-998X;

Грицак Людмила Русланівна (Тернопіль) – доктор біологічних наук, професор, завідувач кафедри ботаніки та зоології, Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка, orcid.org/0000-0002-2872-5201;

Гунько Світлана Олександрівна (Дніпро) – кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри садово-паркового мистецтва та ландшафтного дизайну, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, orcid.org/0000-0002-9551-9803;

Гунько Сергій Іванович (Тернопіль) – заступник директора, Навчально-науковий інститут інноватики, природокористування та інфраструктури, викладач кафедри агробіотехнологій**,** Західноукраїнський національний університет, orcid.org/0009-0002-5129-0266;

Гурська Оксана Вікторівна (Кременець) – кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри біології, екології та методик їх навчання, Кременецька обласна гуманітарно-педагогічна академія імені Тараса Шевченка, orcid.org/0000-0003-0565-3265;

Давидова Ірина Володимирівна (Житомир) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка», orcid.org/0000-0001-6535-3948;

Дем`янчук Вікторія Іванівна (Житомир) – студентка ІІІ курсу факультету гірничої справи, природокористування та будівництва, Державний університет «Житомирська політехніка», orcid.org/0009-0000-4381-8863;

Демчук Людмила Іванівна (Житомир) – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка», orcid.org/0000-0001-5698-7113;

Дефорж Ганна Володимирівна (Кропивницький) – доктор історичних наук, професор, професор кафедри природничих наук та методик викладання, Центральноукраїнський державний університет імені Володимира Винниченка, orcid.org/0000-0002-1114-3205;

Дідківська Юліана Андріївна (Житомир) – студентка ІІІ курсу факультету гірничої справи, природокористування та будівництва, Державний університет «Житомирська політехніка», orcid.org/0009-0001-9557-5143;

Дмитренко Тетяна Володимирівна (Харків) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерної екології міст, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, orcid.org/0000-0002-0447-644X;

Дмитруха Тетяна Іллівна (Київ) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології, хімії та хімічної технології, Національний університет «Київський авіаційний інститут»,orcid.org/0000-0001-5195-9519;

Дорошенко Антон Валерійович (Дніпро) – аспірант кафедри загальної біології та водних біоресурсів, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, orcid.org/0000-0002-9237-6560;

Дригулич Петро Григорович (Дрогобич) – кандидат геологічних наук, голова, ГО «Центр сталого розвитку громад», orcid.org/0009-0008-6546-8161;

Дригулич Сергій Петрович (Івано-Франківськ) – аспірант, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, orcid.org/0009-0001-7578-9523;

Дудар Владислав Володимирович (Київ) – аспірант кафедри екології, хімії та хімічної технології, Національний університет «Київський авіаційний інститут», orcid.org/0009-0006-9677-9531;

Дунаєвська Оксана Феліксівна (Житомир) – доктор біологічних наук, професор, професор кафедри екології, Поліський національний університет, orcid.org/0000-0002-8999-8211;

Жмуд Вєроніка (Київ) – студентка ІІ курсу, Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», orcid.org/0009-0001-4819-214X;

Жмурко Михайло Олександрович (Кам'янець-Подільський) – аспірант кафедри біології та екології, Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, orcid.org/0009-0008-7366-0276;

Жукова Олена Григорівна (Київ) – кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій охорони навколишнього середовища та охорони праці, Київський національний університет будівництва та архітектури, orcid.org/0000-0003-0662-9996;

Зеленчук Іван Дмитрович (Умань) – аспірант кафедри екології та безпеки життєдіяльності, Уманський національний університет, orcid.org/0009-0008-8517-6617;

Іваніна Валим Віталійович (Київ) – доктор сільськогосподарських наук, професор, провідний науковий співробітник відділу агрохімічних досліджень, Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків Національної академії аграрних наук України, orcid.org/0000-0002-9471-114X;

Ігор Олександрович Прокопенко (Київ) – аспірант кафедри водопостачання та водовідведення, Київський національний університет будівництва та архітектури, orcid.org/0009-0009-0129-3283;

Іляшевич Михайло Михайлович (Львів) – аспірант кафедри екологічної безпеки, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, orcid.org/0009-0008-0089-2543;

Карпенко Юрій Олександрович (Чернігів) – кандидат біологічних наук, доцент, завідувач кафедри екології, географії та природокористування, Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка, orcid.org/0000-0002-1703-84732;

Квак Володимир Михайлович (Київ) – кандидат сільськогосподарських наук, завідувач лабораторії науково-технічного забезпечення технологій виробництва, переробки та використання біомаси, Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків Національної академії аграрних наук України, orcid.org/0000-0001-8996-0101;

Кватернюк Сергій Михайлович (Вінниця) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, Вінницький національний технічний університет, orcid.org/0000-0003-1296-8249;

Кленін Олег Володимирович (Дніпро) – доктор економічних наук, професор, професор по кафедрі економічної інженерії, Приазовський державний технічний університет, orcid.org/0000-0003-3146-4847;

Кобзиста Оксана Петрівна (Київ) – кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедра екології та технологій захисту навколишнього середовища, Національний транспортний університет, orcid.org/0000-0002-9944-0609;

Коваленко Юрій Леонідович (Харків) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри інженерної екології міст, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, orcid.org/0000-0002-2491-2309;

Ковальчук Олег Миколайович (Житомир) – доктор філософії, завідувач вимірювальною лабораторією, Поліський національний університет, orcid.org/0000-0003-2526-0020;

Колодій Марина Анатоліївна (Житомир) – старший викладач кафедри гірничих технологій та будівництва імені професора Бакка М.Т., Державний університет «Житомирська політехніка», orcid.org/0000-0001-5133-552X;

Кордуба Ірина Богданівна (Київ) – доктор технічних наук, доцент кафедри технологій охорони навколишнього середовища та охорони праці, Київський національний університет будівництва та архітектури, orcid.org/0000-0001-5135-8465;

Кот Іван Тарасович (Київ) – студент ІІ курсу, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», orcid.org/0009-0007-5556-7353;

Кравець Марія Ярославівна (Тернопіль) – аспірантка кафедри ботаніки та зоології, Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка, orcid.org/0009-0003-1880-6010;

Кравчук Володимир Іванович (Київ) – доктор технічних наук, професор, академік Національної академії аграрних наук України, головний науковий співробітник відділу селекції і сталих технологій вирощування та переробляння біоенергетичних культу, Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків Національної академії аграрних наук України, orcid.org/0000-0002-7991-0351;

Кравчук-Ободзінська Таїса Валеріївна (Житомир) – доктор філософії, старший викладач кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка», orcid.org/0000-0002-1898-2837;

Кричевська Діана Анатоліївна (Львів) – кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри конструктивної географії і картографії, Львівський національний університет імені Івана Франка, orcid.org/0000-0003-3423-5943;

Криштоп Євген Анатолійович (Харків) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри екології та біотехнологій в рослинництві, Державний біотехнологічний університет, orcid.org/0000-0002-2868-3101;

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;

Кудряшова Катерина Миколаївна (Чернігів) – кандидат економічних наук, завідувачка кафедри аграрних технологій та лісового господарства, Національний університет «Чернігівська політехніка», orcid.org/0000-0002-5626-0958;

Курбет Тетяна Володимирівна (Житомир) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка», orcid.org/0000-0001-7820-4263;

Кухтик Наталія Олександрівна (Київ) – PhD, доцент, доцент кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища, Національний транспортний університет, orcid.org/0000-0001-9467-891X;

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

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;

Ларичева Олена Миколаївна (Миколаїв) – кандидат біологічних наук, доцент, завідувач кафедри фармації, фармакології та хімії, Чорноморський національний університет імені Петра Могили, orcid.org/0000-0001-7399-3339;

Латуша Дмитро Русланович (Вінниця) – аспірант кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, Інститут докторантури та аспірантури Вінницького національного технічного університету, orcid.org/0009-0005-7808-1300;

Лукіна Єва Вячеславівна (Київ) – студентка І курсу магістратури природничого факультету, Український державний університет імені Михайла Драгоманова, orcid.org/0009-0006-3920-4299;

Любинський Олександр Іванович (Камянець-Подільський) – доктор сільськогосподарських наук, професор, професор кафедри біології та екології, Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, orcid.org/0000-0001-6084-131X;

Любінська Людмила Григорівна (Кам'янець-Подільський) – доктор біологічних наук, доцент, професор кафедри біології та екології, Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, orcid.org/0000-0002-2529-4311;

Максименко Максим Павлович (Вінниця) – аспірант кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, Інститут докторантури та аспірантури Вінницького національного технічного університету, orcid.org/0009-0004-3921-3174;

Марчук Каріна Олександрівна (Житомир) – студентка IV курсу факультету гірничої справи, природокористування та будівництва, Державний університет «Житомирська політехніка», orcid.org/0009-0001-4580-9044;

Матусяк Михайло Васильович (Вінниця) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри лісового та садово-паркового господарства, Навчально-науковий інститут агротехнологій та природокористування Вінницького національного аграрного університету, orcid.org/0000-0001-8099-7290;

Махняк Андрій Ярославович (Львів) – аспірант кафедри екологічної безпеки та природоохоронної діяльності, Національний університет «Львівська політехніка», orcid.org/0009-0003-5075-6631;

Мацюк Світлана Анатоліївна (Харків) – завідувач лабораторії, ТОВ «Лабораторія якості води «ПЛАЯ», orcid.org/0009-0007-9657-0671;

Машиністов Віктор Егорович (Дніпро) – кандидат технічних наук, доцент**,** доцент**,** Навчально науковий інститут «Дніпровський металургійний інститут» Українського державного університету науки і технологій, orcid.org/0000-0003-3444-5713;

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;

Мельниченко Віталій Валерійович (Київ) – начальник екологічної лабораторії, ТОВ «НВП «Екозахист», orcid.org/0009-0006-4801-6142;

Мирза-Сіденко Валентина Миколаївна (Кропивницький) – кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри природничих наук та методик викладання, Центральноукраїнський державний університет імені Володимира Винниченка, orcid.org/0000-0001-8695-9789;

Михалюк Ілона Михайлівна (Кременець) – кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри біології, екології та методик їх навчання, Кременецька обласна гуманітарно-педагогічна академія імені Тараса Шевченка, orcid.org/0000-0002-6455-0015;

Мороз Леся Миколаївна (Умань) – кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри біології та хімії, Уманський національний університет, orcid.org/0000-0002-2007-5443;

Найдьонова Галина Георгіївна (Кропивницький) – кандидат педагогічних наук, старший викладач кафедри природничих наук та методик викладання, Центральноукраїнський державний університет імені Володимира Винниченка, orcid.org/0000-0002-9472-6704;

Николаєнко Юлія Миколаївна (Дніпро) – старший викладач, Навчально-науковий інститут «Дніпровський металургійний інститут» Українського державного університету науки і технологій, orcid.org/0000-0002-1559-9584;

Новосільський Мар'ян Володимирович (Івано-Франківськ) – аспірант кафедри нафтогазової геофізики, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, orcid.org/0009-0008-9123-8212;

Олександр Сергійович Штика (Лодзь, Польща) – кандидат хімічних наук, доцент, Інститут загальної та екологічної хімії Лодзинського технологічного університету, orcid.org/0000-0001-9593-8971;

Олефіренко Борис Анатолійович (с. Центральне) – доктор філософії, заступник директора з фінансово-економічних та маркетингових досліджень, Миронівський інститут пшениці імені В.М. Ремесла Ремесла Національної академії аграрних наук України, orcid.org/0000-0002-6652-9199;

Олійник Тетяна Миколаївна (смт. Немішаєве) – кандидат сільськогосподарських наук, заступник директора з наукової роботи, Інститут картоплярства Національної академії аграрних наук України, orcid.org/0000-0002-7235-9413;

Олішевська Юлія Анатоліївна (Київ) – кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри географії України, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, orcid.org/0000-0002-3132-1363;

Орфанова Марія Михайлівна (Івано-Франківськ) – кандидат технічних наук, завідувач кафедри екології, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, orcid.org/0000-0002-4931-8074;

Пакуляк Андрій Юрійович (Кам'янець-Подільський) – аспірант, Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, orcid.org/0009-0006-9552-9610;

Панкова Сніжана Олексіївна (Вінниця) – доктор філософії з агрономії, старший викладач кафедри лісового та садово-паркового господарства, Навчально-науковий інститут агротехнологій та природокористування Вінницького національного аграрного університету, orcid.org/0000-0002-5975-5251;

Панчук Ольга Ігорівна (Кременець) − кандидат біологічних наук, доцент кафедри біології, екології та методик їх навчання, Кременецька обласна гуманітарно-педагогічна академія імені Тараса Шевченка, orcid.org/0000-0003-3650-9813;

Патрушева Лариса Іванівна (Миколаїв) – кандидат географічних наук, доцент кафедри екології, Чорноморський національний університет імені Петра Могили, orcid.org/0009-0006-1269-8161;

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;

Пикало Сергій Володимирович (с. Центральне) – кандидат біологічних наук, старший дослідник, провідний науковий співробітник відділу біотехнології, генетики і фізіології, Миронівський інститут пшениці імені В.М. Ремесла Ремесла Національної академії аграрних наук України, orcid.org/0000-0002-3158-3830;

Питуляк Мар'яна Миколаївна (Тернопіль) – студентка І курсу магістратури, Навчально-науковий інститут інноватики, природокористування та інфраструктури Західноукраїнського національного університету, orcid.org/0009-0004-7530-4348;

Питуляк Микола Васильович (Тернопіль) – кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри агробіотехнологій, Західноукраїнський національний університет, orcid.org/0000-0002-9446-9859;

Питуляк Мирослава Романівна (Тернопіль) – кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри екології і охорони здоров'я, Західноукраїнський національний університет, orcid.org/0000-0001-5565-4915;

Піддубна Антоніна Миколаївна (Вінниця) – доктор філософії з агрономії, старший викладач кафедри лісового та садово-паркового господарства, Навчально-науковий інститут агротехнологій та природокористування Вінницького національного аграрного університету, orcid.org/0000-0002-0204-1338;

Пірич Аліна Володимирівна (с. Центральне) – кандидат сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник відділу біотехнології, генетики і фізіології, Миронівський інститут пшениці імені В.М. Ремесла Ремесла Національної академії аграрних наук України, orcid.org/0000-0003-2312-9774;

Погорєлова Оксана Мирославівна (Тернопіль) – кандидат біологічних наук, доцент кафедри екології та охорони здоров'я, Західноукраїнський національний університет, orcid.org/0000-0002-6839-2253;

Подзерей Роман Вікторович (Умань) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри біології та хімії, Уманський національний університет, orcid.org/0000-0001-7667-6515;

Полив'янчук Андрій Павлович (Вінниця) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, Вінницький національний технічний університет, orcid.org/0000-0002-9966-1938;

Пучка Олександр Вікторович (Кам'янець-Подільський) – аспірант кафедри біології та екології, Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, orcid.org/0009-0007-7817-0797;

Радосла Чешельські (Лодзь, Польща) – кандидат хімічних наук, хімік, Інститут загальної та екологічної хімії Лодзинського технологічного університету, orcid.org/0000-0002-0720-6875;

Рак Павло Вікторович (Дніпро) – аспірант, Навчально науковий інститут «Дніпровський металургійний інститут» Українського державного університету науки і технологій;

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;

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

Русецька Наталя Миколаївна (Житомир) – викладач природничих дисциплін, Житомирський агротехнічний коледж, orcid.org/0000-0002-5568-4708;

Сапа Євгенія Юріївна (Дніпро) – магістр з освітньої програми «Садово-паркове господарство», помічник лісничого, Вільнянське лісництва Новомосковське надлісництво ДП «Ліси України» філія «Східний лісовий офіс», orcid.org/0009-0000-9761-310X;

Свердлов Володимир Олександрович (Чернігів) – доктор філософії з біології, старший викладач кафедри екології, географії та природокористування, Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка, orcid.org/0000-0002-4079-0831;

Світельський Микола Михайлович (Житомир) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри ботаніки, біоресурсів та збереження біорізноманіття, Житомирський державний університет імені Івана Франка, orcid.org/0000-0003-1501-4168

Сікач Тетяна Іванівна (Житомир) – асистент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка», orcid.org/0009-0001-1557-0992;

Скиба Галина Віталіївна (Житомир) – кандидат технічних наук, доцент кафедри сталої інфраструктури та гідроекології, Державний університет «Житомирська політехніка», orcid.org/0000-0002-4981-4975;

Соболенко Любов Юліянівна (Умань) – кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри біології та хімії, Уманський національний університет, orcid.org/0000-0003-1196-4772;

Сокульський Ігор Миколайович (Житомир) -кандидат ветеринарних наук, доцент, доцент кафедри внутрішньої патології та морфології, Поліський національний університет, orcid.org/0000-0002-6237-0328;

Соловйова Інна Анатоліївна (Дніпро) – кандидат технічних наук, доцент, доцент, Навчально науковий інститут «Дніпровський металургійний інститут» Українського державного університету науки і технологій, orcid.org/0000-0003-1569-567X;

Сонько Сергій Петрович (Умань) – доктор географічних наук, професор кафедри екології та безпеки життєдіяльності, Уманський національний університет, orcid.org/0000-0002-7080-9564;

Сорокіна Світлана Іванівна (Умань) – кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри біології та хімії, Уманський національний університет, orcid.org/0000-0001-8155-001X;

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;

Старжинський Павло Станіславович (Київ) – аспірант кафедри технологій охорони навколишнього середовища та охорони праці, Київський національний університет будівництва та архітектури, orcid.org/0009-0004-4495-9309;

Стасевич Сергій Павлович (Львів) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екологічної безпеки та природоохоронної діяльності, Національний університет «Львівська політехніка», orcid.org/0000-0002-9985-9485;

Суслова Олена Петрівна (Кривий Ріг) – кандидат біологічних наук, с.н.с. відділу інтродукції та акліматизації рослин, Криворізький ботанічний сад Національної академії наук України, orcid.org/0000-0002-6371-7514;

Суходольська Ірина Леонідівна (Рівне) – кандидат біологічних наук, доцент кафедри природничих наук, Рівненський державний гуманітарний університет, orcid.org/0000-0001-7502-3061;

Тарасюк Микола Володимирович (Київ) – аспірант кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища, Національний транспортний університет, orcid.org/0009-0005-5544-0278;

Томаш Манєцкі (Лодзь, Польща) – доктор хімічних наук, професор, Інститут загальної та екологічної хімії Лодзинського технологічного університету, orcid.org/0000-0003-4192-3955;

Тригуба Олена Василівна (Кременець) − кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри біології, екології та методик їх навчання, Кременецька обласна гуманітарно-педагогічна академія імені Тараса Шевченка, orcid.org/0000-0002-7264-7714;

Фролов Валерій Федорович (Київ) – доктор технічних наук, доцент, науковий співробітник, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України», orcid.org/0000-0003-1675-8476;

Цвях Олена Олександрівна (Миколаїв) – кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри фізичної культури та спорту, Навчально-науковий педагогічний інститут імені В.О. Сухомлинського Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, orcid.org/0000-0002-1119-2170;

Черняк Лариса Миколаївна Черняк (Київ) – доктор технічних наук, доцент, в.о. завідувача кафедри екології, хімії та хімічної технології, Національний університет «Київський авіаційний інститут», orcid.org/0000-0003-4192-3955;

Шарамок Тетяна Сергіївна (Дніпро) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, декан біолого-екологічного факультутету, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, orcid.org/0000-0003-3523-5283;

Шевченко Валентин Олександрович (Вінниця) – аспірант кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, Інститут докторантури та аспірантури Вінницького національного технічного університету, orcid.org/0000-0002-1035-9290;

Шевченко Роман Юрійович (Київ) – кандидат географічних наук, старший науковий співробітник Науково-освітнього центру перепідготовки та підвищення кваліфікації, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України», orcid.org/0000-0002-7528-6184;

Юрченко Тетяна Василівна (с. Центральне) – кандидат сільськогосподарських наук, старший дослідник, завідувачка відділу біотехнології, генетики і фізіології, Миронівський інститут пшениці імені В.М. Ремесла Національної академії аграрних наук України, orcid.org/0000-0003-0164-4003;

Яковлєв Валерій Володимирович (Харків) – доктор геологічних наук, доцент, професор кафедри інженерної екології міст, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, головний гідрогеолог, ТОВ «Лабораторія якості води «ПЛАЯ», orcid.org/0000-0003-2637-6594;

Якубаш Руслан Анатолійович (Кам'янець-Подільський) – директор, Національний природний парк «Подільські Товтри», orcid.org/0009-0006-3259-3228.

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

НОТАТКИ

Наукове видання

ЕКОЛОГІЧНІ НАУКИ

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ **3(66)**

- ***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 – 30.05.2026 р.
Дата друку – 05.06.2026 р. Формат 64x84/8.
Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman. Цифровий друк.
Ум. друк. арк. 42,32. Тираж 100. Замовлення № 0626/600.
Ціна договірна. Віддруковано з готового оригінал-макета